This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Modes opératoires de physique

J. G. Bourbouze, Charles Hemardinquer, Gabriel Lippmann

Digitized by Google

Phys
428
96.5

HARVARD COLLEGE LIBRARY

BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787–1855)
OF BOSTON

FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION

SCIENCE CENTER LIBRARY

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

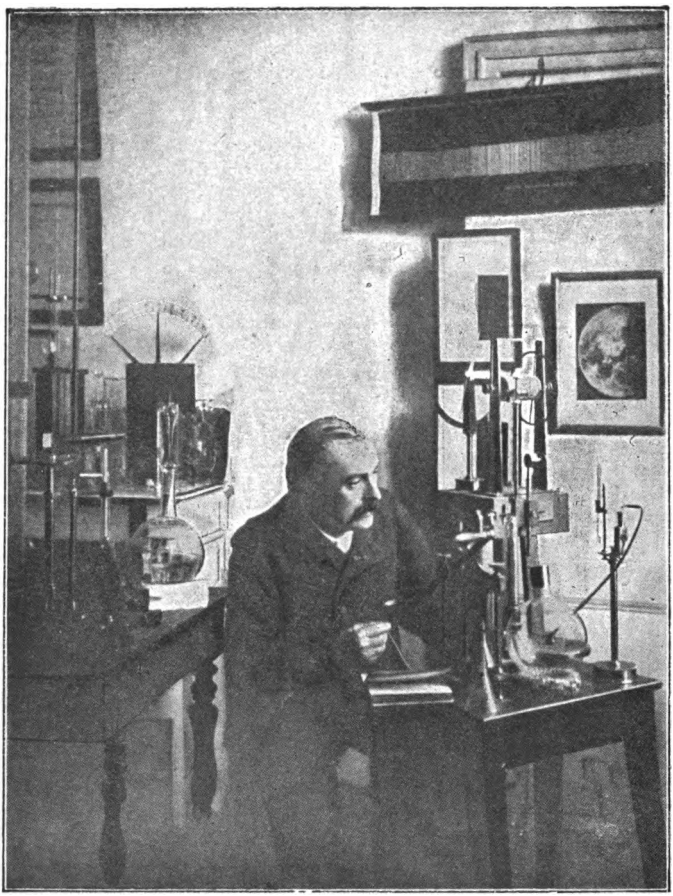
Phys
428
96.5

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google



Cliché du Dr A. VERWAEST

Digitized by Google

MODES OPÉRATOIRES

DE PHYSIQUE

de J.-G. BOURBOUZE

RASSEMBLÉS ET AUGMENTÉS

PAR

CH. HEMARDINQUER

Licencié ès-sciences Mathématiques et Physiques
Ancien élève du Cours Bourbouze
Préparateur à la Faculté des Sciences

Publiés avec l'autorisation de M^me^ V^ve^ BOURBOUZE

PRÉFACE DE

M. G. LIPPMANN

Membre de l'Institut

PARIS
IMPRIMERIE E. DESGRANDCHAMPS
19, PLACE DENFERT-ROCHEREAU, 19
—
1896

Digitized by Google

Phys 428.96.5

HARVARD COLLEGE LIBRARY
DEGRAND FUND
Mar. 7, 1924

Digitized by Google

PRÉFACE

Le nom de M. Bourbouze est loin d'être oublié à la Sorbonne, bien que cet homme modeste et savant soit mort en 1889 après plusieurs années d'inactivité. M. Bourbouze a été pendant longtemps préparateur du cours de physique à la Faculté des sciences; préparateur modèle, car il avait la passion de l'expérience, le goût de l'enseignement; il était habile constructeur en même temps qu'inventeur ingénieux. On lui doit des appareils — galvanomètres, sirènes, lampes — toujours employés aujourd'hui. En 1870 il inventait la télégraphie sans fil, à l'usage de Paris assiégé.

Pendant que M. Bourbouze faisait manipuler les élèves de la Sorbonne, il prenait des notes. Ces notes, rassemblées par sa veuve et classées par M. Hemardinquer, forment le présent volume : ouvrage sans prétentions, mais qui répond à son but et à ses origines; il est simple et pratique.

Ce ne sont pas là les qualités qui semblent avoir prédominé dans l'instruction des jeunes gens qui se présentent au baccalauréat, ou qui entrent à la Faculté. Notre enseignement secondaire est étendu, mais il manque de solidité, du moins pour les sciences physiques. Nos candidats n'aiment pas à résoudre un problème; ils trouvent en général plus commode de traiter ce qu'on appelle la question des cours, c'est-à-dire de rédiger par cœur une petite leçon de Faculté. On les trouve prêts à exposer les théories de phénomènes qu'ils se représentent imparfaitement. Il leur arrive de savoir la physique comme M. Jourdain savait l'escrime, par raison démonstrative.

Digitized by Google

On ne peut enseigner sérieusement la physique qu'en mettant les élèves en contact avec l'expérience. Il serait indispensable de les faire manipuler, non point passivement, mais en leur apprenant à user de toute leur initiative, sauf à simplifier les programmes.

Pour les manipulations qui leur sont demandées à la Faculté des sciences, l'ouvrage de M. Bourbouze leur sera un utile conseiller.

G. LIPPMANN.

Digitized by Google

Il ne nous appartient pas de retracer la vie et les œuvres de J.-G. Bourbouze. D'autres voix plus autorisées le feront. Nous rappellerons seulement le désir qu'il avait longtemps avant sa mort (septembre 1889), de rassembler et de publier des modes opératoires, composés pour le cours qu'il faisait gratuitement chez lui, et rédigés sous une forme si simple et si claire que ceux-là même qui n'avaient aucune notion de physique pouvaient, grâce à eux, faire des manipulations assez convenables. La mort a interrompu brutalement la réalisation de ce projet, et Bourbouze ne laissa dans ses cartons qu'une quantité de notes plus ou moins éparses et dans lesquelles on retrouve le caractère timide, hésitant et observateur tout à la fois de ce savant modeste.

Ce sont ces notes que Mme Vve Bourbouze nous a fait l'honneur de nous communiquer, en nous laissant le délicat devoir de les rassembler et de les mettre au point. Nous avons dû, dans l'intérêt même de l'ouvrage, compléter en beaucoup de points les modes opératoires, ajoutant ici une méthode nouvelle, corrigeant ailleurs une méthode abandonnée ou modifiée, ajoutant tantôt des chapitres entiers.

Mais nous nous sommes efforcé, dans la mesure du possible, de laisser à l'ouvrage la forme que voulait lui donner notre regretté professeur.

En principe, et dans l'idée même de Bourbouze, cet ouvrage était destiné aux élèves qui suivaient les manipulations qu'il faisait faire chez lui le dimanche matin. C'est encore aux élèves qui suivent nos cours à la Société des Laboratoires Bourbouze que ce livre est destiné.

Cependant, nous espérons que les étudiants qui, pour la première fois, font des travaux de physique, le con-

Digitized by Google

sulteront avec fruit. Nous avons dû, forcément, faire un choix de manipulations. Nous avons tout d'abord écarté complètement celles qui exigeaient des connaissances physiques trop élevées.

On nous reprochera peut-être de nous être trop étendu, comme à plaisir, sur certains modes opératoires, qui n'offrant pas un grand degré de précision dans les mesures effectuées, sont souvent dédaignés dans les laboratoires d'enseignement. L'exemple de Bourbouze et l'expérience personnelle que nous en faisons à notre cours nous ont paru prouver qu'en tout cas, elles constituaient de très bons exercices pratiques pour les débutants en physique, et les résultats obtenus dans nos laboratoires ont montré l'exactitude de ce fait.

Ce livre, disons-le bien, n'est pas ce que l'on est convenu d'appeler un livre de physique, c'est un manuel opératoire, et notre but sera largement atteint s'il vient en aide à ceux qui le consulteront.

Qu'il nous soit permis, en terminant, d'adresser nos affectueux hommages à M^me^ V^ve^ Bourbouze, qui n'a pas craint de nous confier une mission si délicate et en même temps nos remerciements respectueux à M. le professeur G. Lippmann, qui nous a fait l'honneur d'écrire la préface de ce livre.

CH. HEMARDINQUER.

Paris, 5 juin 1896.

Digitized by Google

MESURES — INSTRUMENTS DE MESURE

GÉNÉRALITÉS SUR LES MESURES

Mesurer une grandeur quelconque, c'est la comparer à une autre grandeur de *même espèce* prise pour *unité*.

Nous appellerons *valeur numérique* d'une grandeur le nombre qui exprime combien de fois cette grandeur contient la grandeur unité.

Pour distinguer dans l'écriture, nous représenterons par [G] le nom de la grandeur que nous considérons et par $\mathcal{G}$ la valeur numérique de cette grandeur.

1re *Proposition.* — Le rapport de deux grandeurs de même espèce est égal au rapport de leurs valeurs numériques.

2e *Proposition.* — Si l'unité devient n fois plus petite, le nombre qui mesure la grandeur considérée devient n fois plus grand, et inversement.

3e *Proposition.* — On dit qu'une grandeur est par rapport à une autre de *dimension* α quand la première est proportionnelle à la puissance α de la seconde.

Ainsi une surface est de dimension 2 par rapport à une longueur.

Un volume est de dimension 3 par rapport à une longueur, etc.

Les théorèmes de géométrie et les lois de la physique nous montrent que les diverses grandeurs que l'on peut considérer sont liées par des relations déterminées.

Nous pouvons donc concevoir immédiatement que certaines de ces grandeurs étant déterminées, nous pourrons en déduire d'autres.

On appelle *unités fondamentales* les grandeurs prises pour unités et de la connaissance desquelles on peut, au moyen des formules, déduire les unités d'espèces différentes.

La réunion des unités fondamentales constitue un *système d'unités.*

Les autres unités portent alors le nom d'*unités dérivées.*

Digitized by Google

Les différentes grandeurs que l'on a à considérer en physique peuvent se ranger en trois grandes classes :

1° Les *grandeurs géométriques*. — Ex. : longueur, surface, volume, angle, etc.

2° Les *grandeurs cinématiques*. — Ex. : temps, vitesse, accélération, etc.

3° Les *grandeurs dynamiques*. — Ex. : force, masse, poids, poids spécifique, pression, etc.

L'expérience montre qu'on peut former un système d'unités en prenant trois grandeurs dans ces trois classes, à condition de ne pas en prendre plus d'une dans la première, ni plus de deux dans la seconde, et d'en prendre toujours au moins une dans la troisième.

Les systèmes d'unités les plus communément employés comprennent une grandeur de chaque classe.

C'est ainsi que le *système métrique* est fondé sur trois unités *(Longueur, Temps, Force)*.

Nous ne passerons pas ici en revue les différents systèmes employés, soit en France, soit à l'étranger ; nous nous bornerons à exposer comment, étant donné un système quelconque, on peut passer d'une mesure effectuée dans ce système à la valeur numérique de cette même mesure dans un autre système, et nous ferons l'application au système universellement adopté pour les mesures scientifiques et connu sous le nom de *système C G S (centimètre, gramme, seconde)*.

Symboles, — soit une grandeur quelconque $[G_1]$.

Supposons qu'elle vaille $[\mathcal{G}]$ fois l'unité de même espèce [G], nous aurons

$$[G_1] = \mathcal{G}\,[G]$$

[G] étant une unité dérivée, d'après la définition même, pourra s'exprimer en fonction des unités fondamentales, et si l'expérience nous a prouvé que cette grandeur est de dimension α par rapport à la longueur, de dimension β par rapport au temps, et de dimension γ par rapport à la force, nous écrirons

$$[G] = [L]^{\alpha}\,[T]^{\beta}\,[F]^{\gamma}.$$

Cette expression de [G] est ce que nous appellerons le *symbole* de cette grandeur.

Digitized by Google

Exemple : le symbole d'une surface est $[L]^2$.

» d'un volume est $[L]^3$.

» d'une vitesse est $\frac{[L]}{[T]}$ ou $[L][T]^{-1}$.

» d'un poids spécifique est $\frac{[F]}{[L]^3} = [F][L]^{-3}$.

Et ainsi de suite.

Donc, dans ce système, la grandeur $[G_1]$ est représentée par

$$[G] = \mathcal{G}\,[L]^{\alpha}\,[T]^{\beta}\,[F]^{\gamma},$$

où [L] représente l'unité de la longueur, le mètre, par exemple, s'il s'agit du système métrique.

[T] L'unité de temps, la seconde.

[F] L'unité de force, le kilogramme.

Supposons maintenant que nous prenions comme unités fondamentales une longueur, le *centimètre*.

Un temps, la *seconde*.

Une masse, la *masse* du centimètre cube d'eau distillée à 4°.

Dans un pareil système on aura

$$[G_1] = \mathcal{G}'\,[C]^{\alpha'}\,[T]^{\beta'}\,[M]^{\gamma'},$$

Et égalant ces deux valeurs de $[G_1]$

$$\mathcal{G}\,[L]^{\alpha}\,[T]^{\beta}\,[F]^{\gamma} = \mathcal{G}'\,[C]^{\alpha'}\,[T]^{\beta'}\,[M]^{\gamma'},$$

d'où l'on tire

$$\mathcal{G}' = \mathcal{G}\,\frac{[L]^{\alpha}\,[T]^{\beta}\,[F]^{\gamma}}{[C]^{\alpha'}\,[T]^{\beta'}\,[M]^{\gamma'}}.$$

On déduira donc $\mathcal{G}'$ de $\mathcal{G}$ si l'on connaît le rapport des unités des deux systèmes.

S'il s'agit du cas qui nous occupe, système métrique et système C G S, on commence par évaluer [F], c'est-à-dire le kilogramme poids par rapport à [M], c'est-à-dire le gramme masse, on trouve

$$[\text{Kilogramme poids}] = 1000\ [\text{grammes poids}],$$
$$[\text{Gramme poids}] = g\ [\text{grammes masse}].$$

g étant l'accélération de la pesanteur.

Digitized by Google

Si cette accélération est évaluée en centimètres, l'égalité précédente se réduit à une forme plus simple, qui est

$$\mathcal{G}' = \mathcal{G}\left[\frac{\text{mètres}}{\text{centimètres}}\right]^{\alpha}[981000]^{\gamma}.$$

Nous n'entrerons pas dans de plus amples détails sur ce changement d'unités. Nous nous contenterons de citer les principales unités et leurs valeurs relatives dans les deux systèmes (1).

L'unité de force du système métrique est le kilogramme.

L'unité de force du système C G S est la dyne.

L'unité de travail du système métrique est le kilogrammètre.

L'unité de travail du système C G S est l'erg; un multiple souvent employé, est le megerg, qui vaut 10^6 fois l'erg, de même que la mégadyne vaut 10^6 dynes.

TABLEAU

[gramme] $= 981$ [dyne].
[kilogramme] $= 981 \times 10^3$ [dyne].
[kilogrammètre] $= 98{,}1$ [megerg].
[cheval-vapeur] $= 75 \times 98{,}1$ [megerg] $= 73{,}6 \times 10^8$ [erg].

Nous ferons, à propos de mesures électriques, des applications de ce système C G S.

En définitive, les mesures des diverses grandeurs peuvent se ramener à trois espèces différentes de mesures :

1° *Mesures de longueurs;*
2° *Mesures de temps;*
3° *Mesures de masses.*

Nous indiquerons, dans le cours de cet ouvrage, différentes méthodes de mesures pour ces grandeurs, mais nous devons tout de suite mettre l'opérateur en garde contre les erreurs qu'il peut commettre en les effectuant.

Ces erreurs peuvent se ranger en trois catégories :

1° Erreurs *systématiques*, provenant d'un défaut de réglage de l'appareil, d'un vice de construction. Ces erreurs sont les

(1) Voir à ce sujet *Unités et constantes physiques*, de Everett; *Théorie des mesures* de J. Pionchon.

Digitized by Google

plus graves, parce qu'elles sont les moins faciles à constater. On les évitera en vérifiant soigneusement les instruments employés, et au besoin en les contrôlant au moyen d'étalons.

2° Les *erreurs accidentelles* provenant de changements qui peuvent survenir pendant la durée même de l'expérience.

Nous n'entrerons pas dans le détail des corrections mathématiques basées sur le calcul des probabilités. Nous engagerons seulement nos lecteurs à faire, autant que possible, plusieurs mesures consécutives relativement à une même détermination et à prendre la moyenne de ces déterminations. On a ainsi grande chance d'éliminer, du moins partiellement, les erreurs accidentelles.

3° Les *erreurs personnelles*. — Dans toute observation, les qualités spéciales de l'observateur rentrent largement en ligne de compte pour l'évaluation des résultats. Une attention soutenue et une grande habitude résultant d'essais nombreux peuvent seules diminuer le coefficient personnel. Enfin, nous engageons vivement le lecteur à se rendre compte de l'approximation qu'il est en droit d'attendre d'une mesure et d'éviter, dans les résultats numériques, d'indiquer des chiffres décimaux d'ordre inférieur à l'approximation probable que comporte la méthode.

Digitized by Google

INSTRUMENTS DE MESURE

MESURES DES LONGUEURS

Il arrive souvent que la longueur que l'on veut évaluer ne renferme pas toujours un nombre exact de fois l'unité qui sert de mesure. Pour connaître, dans ce cas, la fraction d'unité que l'on devra ajouter à la longueur cherchée L, comprise entre n et $n+1$ divisions de la règle qui donne les unités, on devra avoir recours à l'instrument désigné sous le nom de VERNIER.

VERNIER

Le vernier se compose d'une petite règle rr' qui peut glisser parallèlement le long de la règle principale RR'. Cette dernière étant divisée en millimètres, on devra, pour avoir le dixième de cette unité, diviser le vernier de telle sorte que la 10e division coïncide avec la 9e de la règle principale : chaque division du vernier vaudra ainsi $\frac{9}{10}$ de millimètre (*fig. 1*).

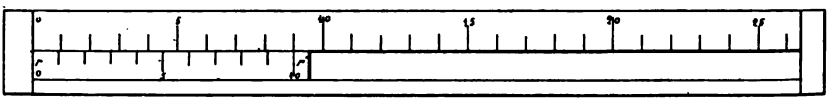


Fig. 1

On voit donc que la 1re division du vernier est en arrière de $\frac{1}{10}$ de millimètre sur la 1re de la règle principale, la 2e de $\frac{2}{10}$, et ainsi de suite jusqu'à la 10e. Il en résulte que la 10e division du vernier sera en retard d'une division de la règle principale quand on aura successivement fait coïncider toutes les divisions du vernier avec celles de la règle RR'.

Digitized by Google

MESURE DES LONGUEURS

Mode opératoire

Placer la pièce *pp'* dont on veut connaître la longueur L, bien parallèlement à la règle principale, de manière que l'une de ses extrémités corresponde avec le zéro de la règle et l'autre extrémité avec le zéro du vernier (*fig.* 2).

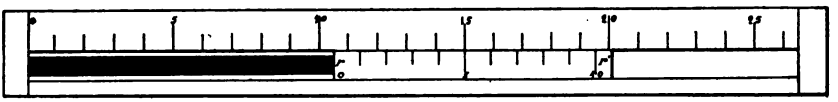


Fig. 2

Le nombre de divisions comprises entre le zéro et la première coïncidence entre l'une de ses divisions et une de la règle principale, fera connaître en dixièmes d'unités la fraction à ajouter aux unités lues sur la règle principale.

On peut constater que la longueur de la pièce PP' est égale à 10 unités $\frac{5}{10}$.

MESURE DES DIAMÈTRES

Calibre à coulisse dit pied-à-bec

Cet instrument (*fig.* 3) se compose d'une règle en acier ordinairement divisée en millimètres. A l'une de ses extrémités est ajusté et soudé un talon *t*, également en acier. Un coulisseau en laiton *cc'* portant un autre talon semblable au premier peut glisser à frottement doux sur cette règle. Il est en outre muni d'une vis de pression *v* qui est destinée à le

Digitized by Google

maintenir dans la position dans laquelle il a été amené, lorsque les deux talons sont en contact de chaque côté du cylindre dont on veut connaître le diamètre

Fig. 3

Sur l'un des côtés du coulisseau *c* on a ménagé une fenêtre dont la partie inférieure est taillée en biseau sur lequel on a tracé les divisions du vernier. Cette disposition permet d'observer les coïncidences avec exactitude.

On voit (*fig. 3*) que $n - 1$ correspond à dix divisions moins une de la règle principale, c'est-à-dire 9 millimètres, et que cet intervalle, reporté sur le biseau de la fenêtre à partir du zéro de la graduation, est divisé en dix parties. Ce vernier fera donc connaître en $\frac{1}{10}$ de millimètre la fraction à ajouter aux millimètres lus sur la règle principale.

Le pied à bec destiné aux mesures des longueurs se termine, du côté opposé aux talons, par deux branches en pointes de compas PP'. Il est en outre muni d'un deuxième coulisseau (*fig. 4*) sur lequel est ajustée une vis de rappel à l'aide de laquelle on fait mouvoir (1) lentement le coulisseau qui porte le vernier, de manière à l'amener avec précision à la position qu'il doit occuper pour la mesure exacte des longueurs.

La figure 4 montre que le zéro du vernier a dépassé la 6e division

(1) On agit sur la vis de rappel après avoir fixé le coulisseau sur la règle à l'aide de la vis V'.

Digitized by Google

de la règle et que c'est la 9e division qui

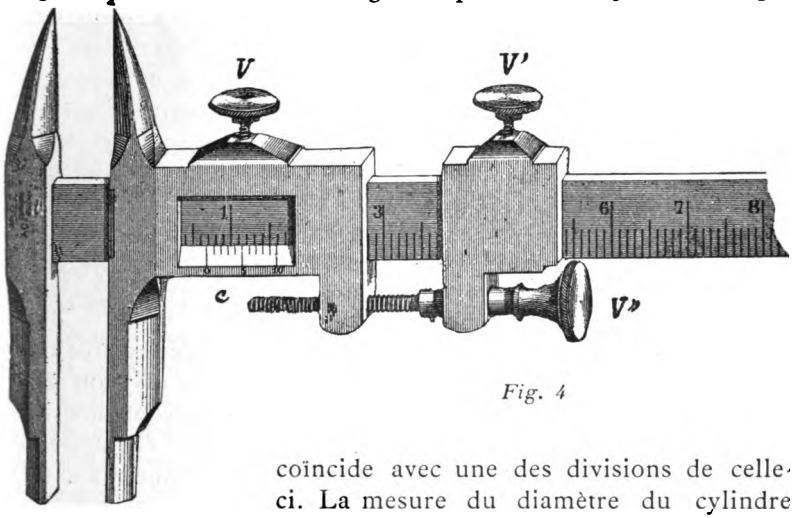


Fig. 4

coïncide avec une des divisions de celle-ci. La mesure du diamètre du cylindre placé entre les deux talons ou la longueur comprise d'un point P à l'autre P' sera égale à 6 millimètres $\frac{9}{10}$.

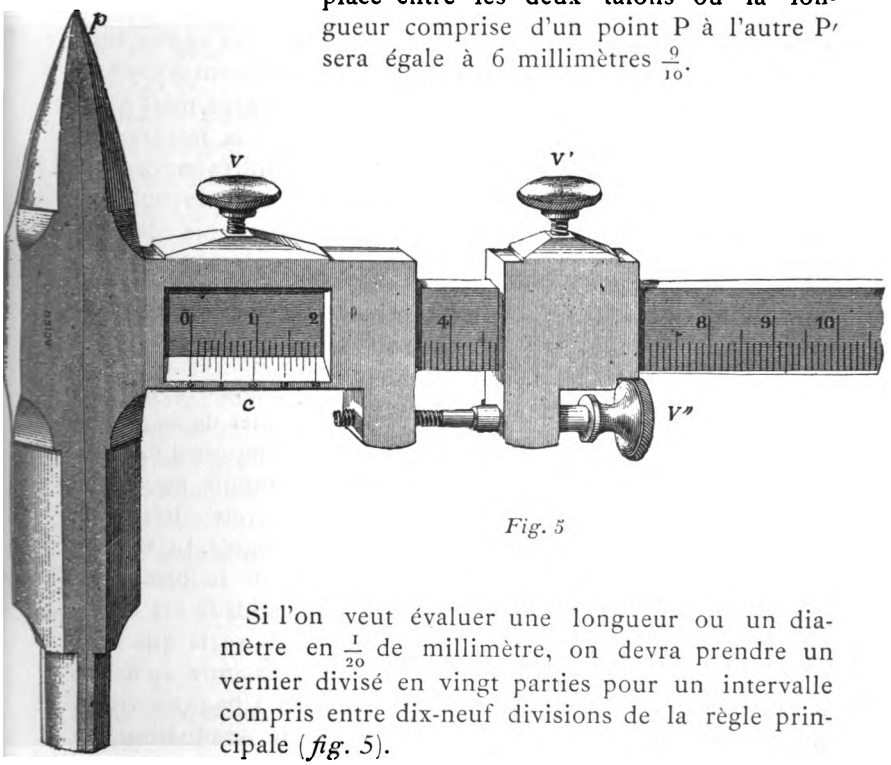


Fig. 5

Si l'on veut évaluer une longueur ou un diamètre en $\frac{1}{20}$ de millimètre, on devra prendre un vernier divisé en vingt parties pour un intervalle compris entre dix-neuf divisions de la règle principale (*fig. 5*).

Digitized by Google

Dans certains calibres à becs, un dispositif spécial permet d'employer ces appareils à la détermination du diamètre intérieur d'un vase cylindrique.

VERNIER CIRCULAIRE

Mesure des arcs de cercle

Le vernier est également applicable à la mesure des arcs de cercle. Il est alors circulaire et concentrique à la division du cercle. Il sert, comme le vernier rectiligne, à faire connaître la fraction d'unité que l'on devra ajouter aux unités comprises, pour l'arc cherché, entre n divisions lues sur le limbe et $n + 1$.

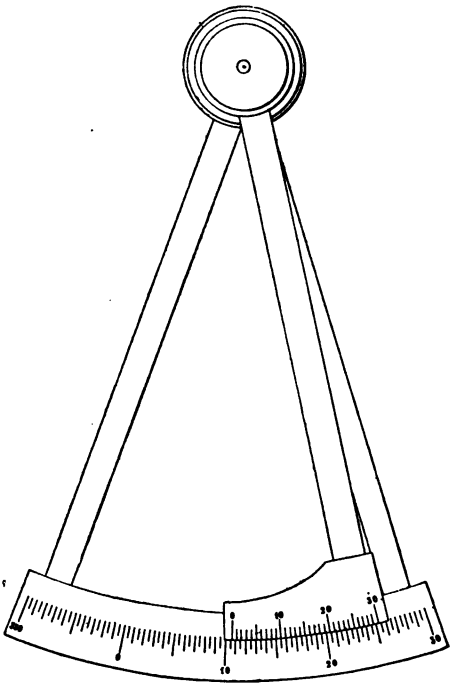


Fig. 6

Les limbes des instruments qui servent à la mesure des angles sont généralement divisés en demi-degrés, mais pour faciliter la lecture, ils sont chiffrés par degrés. Il ne faut pas oublier, en faisant la lecture de l'angle avec le vernier, que le demi-degré est l'unité de la graduation.

La figure 6 représente un vernier de ce genre. Il se compose d'une alidade mobile au centre d'un cercle divisé en demi-degrés. Le vernier tracé sur le biseau de cette alidade est divisé de telle sorte que l'arc compris entre 29 demi-degrés comprenne trente divisions sur le vernier. Chaque division du vernier vaudra ainsi $\frac{1}{30}$ de l'unité de la graduation, ce

Digitized by Google

qui permettra d'apprécier le trentième degrès de l'une quelconque des divisions du cercle, c'est-à-dire la minute.

On voit (*fig.* 7) que le zéro du vernier a été amené entre la 20e et la 21e division du cercle. La coïncidence ayant lieu à la 10e division du vernier, la valeur de l'arc pour cette position sera donc égale à 20 demi-degrés + 10′. Or, comme le limbe est chiffré en degrés, on lira 10°10′.

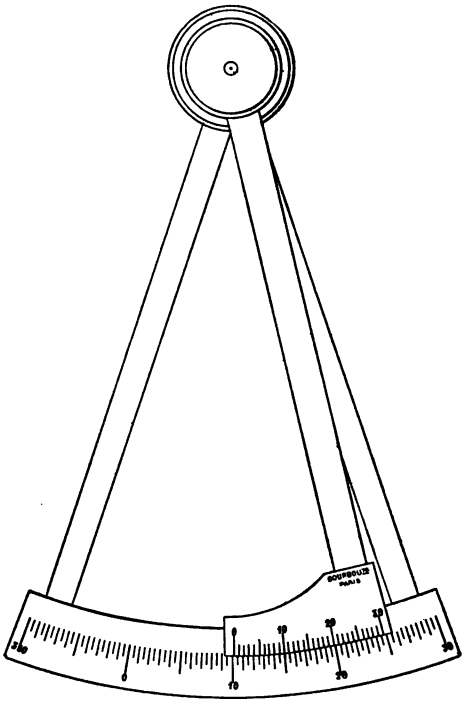


Fig. 7

Si le zéro du vernier se trouvait entre la 21e et la 22e division et que la coïncidence eût encore lieu à la 10e division du vernier, on aurait pour cette nouvelle position 21 demi-degrés 10′. On lira, dans ce cas, 10° et on ajoutera le vingt et unième demi-degré, c'est-à-dire 30′ au nombre des minutes indiquées par le vernier. On aura donc pour la valeur de cet angle 10° + 30′ + 10′ = 10°40′.

En résumé, lorsque le zéro du vernier aura dépassé le demi-degré, on devra ajouter ce demi-degré au nombre des minutes indiquées par le vernier.

Pour amener ce vernier à la position qu'il doit avoir pour qu'il indique exactement l'angle cherché, on devra, comme pour le vernier rectiligne, le faire mouvoir à l'aide d'une vis de rappel, comme nous le verrons dans les instruments d'optique.

VIS MICROMÉTRIQUE

Les vis employées à faire mouvoir, dans des conditions bien déterminées, les différents organes des instruments destinés à

Digitized by Google

mesurer de faibles épaisseurs ou bien à tracer de petits intervalles en parties équidistantes, ou enfin à diviser en *n* parties une longueur donnée, sont appelées vis micrométriques. Ce qui les caractérise, c'est la régularité parfaite avec laquelle les filets sont espacés dans toute leur longueur. Dans ces conditions, si l'on suppose que la vis tourne entre deux points fixes, l'écrou devra avancer, quelle que soit sa position sur la vis, d'une même quantité pour le même nombre de tours, ou bien d'une quantité correspondante à une fraction de tour. C'est sur ce principe qu'est basée la construction de toutes les machines à diviser la ligne droite.

MACHINE A DIVISER

Description

La machine que nous employons pour nos manipulations (*fig. 8*) se compose d'une vis micrométrique en acier, aux extrémités de laquelle on a tourné deux parties cylindriques qui peuvent tourner à frottement doux sur des coussinets. Sur cette vis

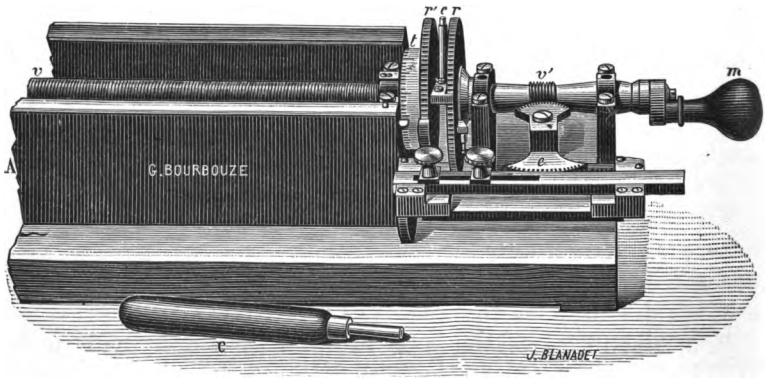


Fig. 8

s'engage un écrou entraînant un chariot qui glisse sur les bords d'un bâti ou banc en fonte, dont l'un des côtés est plat et l'autre à section triangulaire. Ce chariot porte une règle F dont l'unité de la graduation est égale à l'écartement du pas de la vis. Or, comme le pas de cette vis est de 1 millimètre, le chariot avancera de cette même quantité pour chaque tour.

Digitized by Google

Pour déterminer la rotation, et par suite l'avancement du chariot, on a fixé en tête de la vis micrométrique une roue à rochets, c'est-à-dire une roue à dents obliques, dont le cliquet est disposé de manière à ce que l'entraînement de l'écrou se produise dans le sens de la graduation de la règle que supporte le chariot et celle du disque témoin *t*.

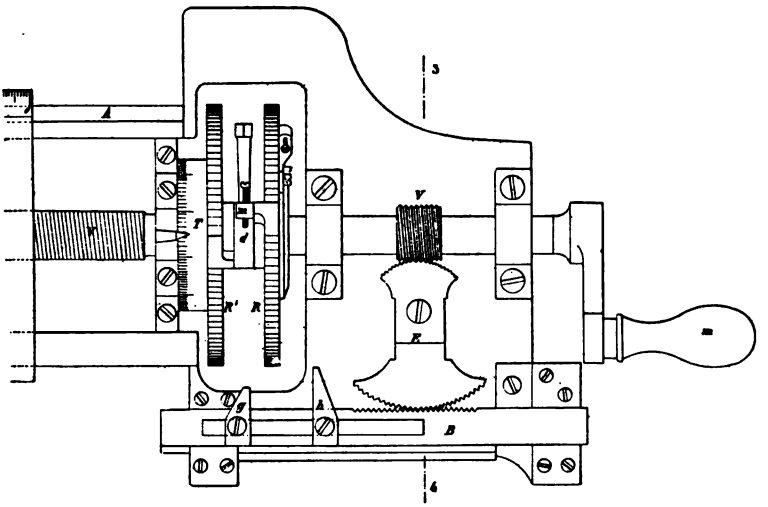


Fig. 9

A l'extrémité du bâti, ou banc, se trouve une tablette en fer qui porte les organes nécessaires à l'avancement du chariot et à la réglementation de la graduation à effectuer. Cette partie distincte de la machine se compose d'une vis sans fin V′ dont l'axe est rigoureusement dans la direction de celui de la vis micrométrique, terminée d'un côté par une manivelle M et du côté opposé par une seconde roue à rochet R′, dont l'obliquité des dents est en sens inverse de celle de la roue R. Entre ces deux roues R′R est monté fou sur l'extrémité de l'axe de la vis sans fin, un porte-cliquets qu'un collier, serré par la vis V″, peut solidariser à cet axe après réglage du cliquet de la roue R suivant la division à obtenir.

En tête du porte-cliquets, est placée une butée de départ *m*, qui vient reposer sur un butoir *g* au début de l'entraînement de la roue R par son cliquet. Sur la face de la roue à rochets R est

Digitized by Google

fixée, au zéro de la graduation, une butée d'arrêt venant en temps opportun se placer en regard d'un butoir mobile *h*.

Les deux butoirs *g* et *h* sont montés sur une coulisse B, appelée va-et-vient, actionnée directement par le double secteur E, commandé par la vis sans fin V′, qui tourne sur les coussinets C C′, et dont les mouvements sont produits par la manivelle M.

Enfin la machine se complète par un traçoir dont le burin X (*fig. 10*) est monté à l'extrémité du levier *p*. Il est articulé à une coulisse *a* parfaitement guidée entre deux coulisseaux horizontaux fixés sur une équerre S. Cette équerre est tenue à hauteur convenable sur un support vertical *s*′ susceptible de se déplacer lui-même sur un deuxième support *s*″, solidement boulonné au bâti A formant le banc sur lequel se meut le chariot C, porteur du tube ou de la règle à diviser.

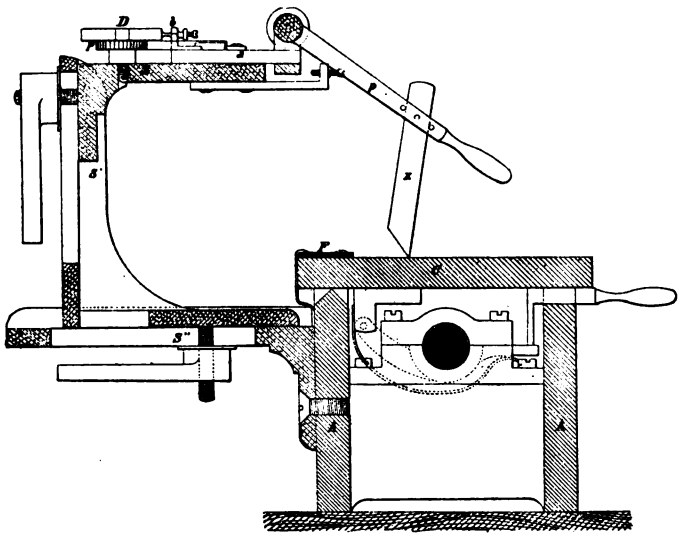


Fig. 10

Sur la coulisse *o* sont fixés un butoir réglable *b* et un cliquet *e* en prise avec les dents d'une roue à rochets P solidaire du disque à échancrures D. Un contre-cliquets *e*, fixé sur le coulisseau C assure la position de la roue à rochets P que le cliquet *e* pousse d'une dent à chaque mouvements de la coulisse, c'est-à-dire par chaque trait gravé.

Digitized by Google

Il résulte de cette disposition que le porte-burin se trouve parfaitement guidé et que ses mouvements n'ont à craindre aucune déviation.

La longueur du trait à graver est limitée par les échancrures et les parties pleines du disque qui viennent successivement se placer devant le butoir par suite du mouvement de va-et-vient que l'on imprime à la coulisse sur laquelle est monté le porte-burin.

Pour faciliter le réglage de la butée de départ fixée sur le porte-cliquets, on a divisé la roue R de manière à ce que chacune de ses divisions corresponde à une dent ou rochet taillé sur le champ de la roue R.

La butée d'arrêt étant fixée au zéro de la graduation il suffit de régler la position du cliquet de la roue R pour faire avancer le chariot d'une quantité correspondante aux déplacements angulaires de la vis qui sera égale au nombre de divisions comprises entre la butée de départ et la butée d'arrêt. Or, comme la roue est divisée en 100 parties et que le pas de la vis est de 1 millimètre, on pourra obtenir des déplacements angulaires correspondant à $\frac{1}{100}$ de millimètre.

L'ensemble de ces dispositions nous permettra donc de régler l'avancement du chariot, soit pour tracer les micromètres qui servent à la mesure des grossissements des microscopes, soit à tracer *n* divisions entre deux points donnés.

DIVISER UNE LONGUEUR DÉTERMINÉE

EN UN CERTAIN NOMBRE DE PARTIES ÉQUIDISTANTES

Mode opératoire

Assujettir la règle à diviser sur le chariot CC'. — Ouvrir l'écrou d'entraînement. — Faire glisser le chariot de manière à amener un des points fixes en coïncidence avec la pointe du traçoir; noter la position de l'index *i* en regard de la règle fixée sur le bord du chariot. — Le faire glisser à nouveau de façon à ce que le deuxième point fixe vienne occuper la position du premier.

Le nombre de divisions qui passeront devant l'index *i* fera connaître le nombre de tours de la vis micrométrique nécessaires au parcours de la distance qui sépare les points $\alpha\beta$ entre lesquels un nombre déterminé de divisions doit être gravé.

Digitized by Google

On obtient ensuite par un simple rapport entre ce nombre de tours et le nombre de divisions à graver entre α et β, l'unité de graduation.

Si, par exemple, on a noté qu'il a fallu déplacer le chariot de

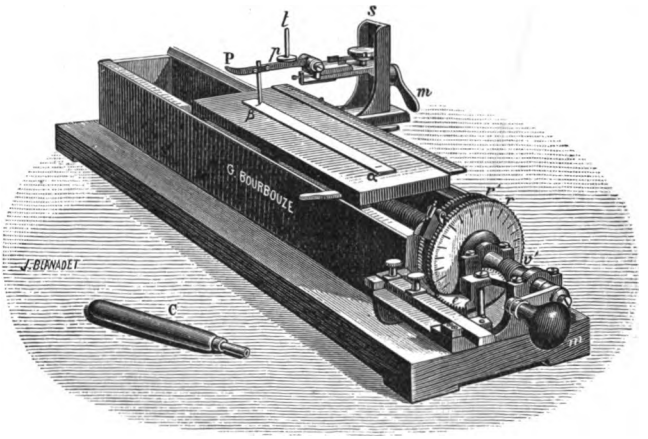


Fig. 11

cent cinquante-huit divisions pour passer d'un point à l'autre, et que *n*, le nombre de divisions à graver, égale 100, l'unité de graduation sera évidemment donnée par le rapport $\frac{158}{100}$ qui est égal à 1 tour 58 centièmes.

Pour régler et déterminer par suite l'avancement du chariot pour cette unité, on devra faire tourner le cliquet *d* de façon à amener celui de la roue *r* à la 58e division, puis le solidariser, après ce réglage, à l'axe de la vis sans fin V′ en serrant le collier C avec la vis V″.

Enfin, après avoir placé le point α en coïncidence avec le traçoir et fermé l'écrou d'entraînement du chariot, on amènera la butée de départ *m* sur le butoir *g*. L'autre butoir *h* devra être fixé sur la coulisse B de telle façon qu'il s'oppose à la continuation du mouvement de la butée d'arrêt *n* lorsque la vis micrométrique aura fait avancer le chariot de l'unité de graduation, c'est-à-dire après 1 tour 58 centièmes de tour.

2e *Exemple.* — Si l'on trouve qu'il a fallu déplacer le chariot de 79 millimètres et que l'on ait à graver vingt-cinq divisions entre deux points déterminés, l'unité de la graduation sera donnée par le rapport $\frac{79}{25} = 3{,}16$.

Dans le cas où le burin n'arriverait pas à coïncider avec le point β pour un nombre entier de tours, on devra fermer l'écrou

Digitized by Google

d'entraînement, l'index étant en regard de la division qui précède la deuxième coïncidence et mettre ensuite la butée de départ sur le butoir *g*. En comptant le nombre des divisions qui passeront devant l'index du tambour *t* pour arriver à faire coïncider le burin sur β, on aura en centièmes de millimètre la fraction de tour cherché.

On obtient ensuite comme précédemment le nombre de tours et fractions de tour, ou de fractions de tour représentant l'unité de graduations par un simple rapport entre le nombre de tours et de fractions de tour de la vis micrométrique et le nombre de divisions à graver entre α β. Soient, par exemple, 79 le nombre de tours et 50 la fraction de tour, on aura $\frac{79,50}{25} = 318$ centièmes de tour, ou 3 tours 18 centièmes. On devra donc, après avoir réglé le cliquet à la 18e division de la roue *r*, fixer la butée d'arrêt après 3 tours 18 centièmes de tour.

En résumé, si D + *d* représente en unités du pas de la vis la distance qui existe entre deux points donnés, *d* étant la fraction de tour et *n* le nombre de divisions à graver, l'unité de la graduation sera représentée par la formule simple $\frac{D+d}{n}$.

Enfin, le disque témoin ou tambour T sert non seulement à faire connaître la fraction de tour souvent nécessaire pour faire coïncider le traçoir au point β, mais encore à règler les butées de départ et d'arrêt de manière à ce que l'avancement du chariot corresponde parfaitement à une révolution entière.

SPHÉROMÈTRE

Le sphéromètre est un appareil qui sert à mesurer la courbure des verres sphériques ainsi que l'épaisseur des lames à faces parallèles.

Il se compose d'une vis en acier dont le pas est ordinairement de un demi-millimètre. A la partie supérieure de cette vis est ajusté un cadran C divisé en cinq cents parties ; l'extrémité opposé se termine en pointe très fine.

L'écrou dans lequel elle peut tourner est fixé sur un trépied dont les trois branches forment entre elles des angles de 120° ; aux extré-

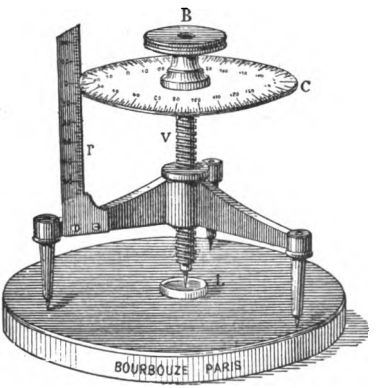


Fig. 12

Digitized by Google

mités de ces trois branches sont fixées trois tiges en acier ayant rigoureusement la même longueur.

Elles doivent être ajustées en outre de telle façon que les pointes qui les terminent viennent tomber sur les sommets du triangle équilatéral inscrit dans le cercle, dont le rayon est égal à la longueur comprise entre la pointe de la vis et celles fixées à chaque extrémité des branches du trépied; il faut, de plus, que l'écrou soit monté de telle façon que l'axe de la vis soit bien perpendiculaire au plan sur lequel repose l'instrument.

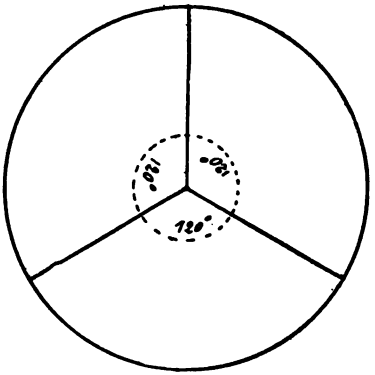


Fig. 13

Sur l'une des branches du trépied est montée une règle *r* divisée de telle façon qu'une division corresponde à l'écartement du pas de la vis.

Dans ces conditions, le cercle devra parcourir verticalement un nombre de divisions égal au nombre de tours de la vis micrométrique. On aura ainsi les unités qui seront mesurées sur cette règle; les fractions d'unité s'obtiennent, comme pour la machine à diviser, en observant le déplacement angulaire du zéro de la graduation du cercle C.

Le pas de la vis du sphéromètre qui nous sert pour nos manipulations est de 1 demi-millimètre, et le cercle étant divisé en cinq cents parties, le déplacement vertical de la pointe de la vis sera donc de 1 demi-millimètre pour un tour entier et de $\frac{1}{500}$ de tour pour chaque division du cercle, ce qui donne $\frac{1}{1000}$ de millimètre pour les fractions d'unité.

Avant de se servir de l'instrument pour déterminer une épaisseur, on devra s'assurer que la surface du plan de verre sur lequel il repose est parfaitement plane.

On arrive à faire cette vérification comme nous allons l'exposer dans le mode opératoire suivant.

Digitized by Google

RÉGLAGE DE L'INSTRUMENT

Mode opératoire

Poser le sphéromètre sur le plan de verre. — Amener la pointe de la vis en contact exact sur sa surface. On arrive facilement à ce résultat en tournant la vis dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que le défaut de contact devienne sensible par la rudesse du frottement ou par le son produit par le plus petit ballottage de l'instrument sur la pointe de la vis. En observant le déplacement angulaire qu'il a fallu faire faire à la tête de la vis pour passer de la première position à la deuxième on constatera que le déplacement angulaire qui produit ce désaccord n'a été que d'une fraction d'une des divisions du cercle, c'est-à-dire moins d'un $\frac{1}{1000}$ de millimètre.

Cela posé, pour reconnaître si le verre sur lequel repose l'instrument est parfaitement plan, on devra, après avoir ramené la pointe au contact, faire glisser l'appareil d'une petite quantité, la plus légère inégalité dans la surface du plan deviendra sensible dès que la vis ou les pointes ne le toucheront plus. Dans le premier cas, c'est-à-dire lorsque la pointe de la vis ne touche plus le plan, la rotation de l'instrument produit un son très différent de celui qui est produit par le ballottage lorsqu'il n'est plus soutenu que par la pointe de la vis.

On devra répéter l'expérience sur les autres parties du verre, sans toucher à la vis, et voir si le contact subsiste partout avec la même précision.

Dans le cas contraire (et c'est le plus fréquent), on fera bien, pour les mesures, de marquer d'un trait de crayon les positions des trois pointes.

MESURES DE L'ÉPAISSEUR D'UNE LAME

A FACES PARALLÈLES

Mode opératoire

Régler la position de la vis de manière à amener avec précision sa pointe en contact avec le plan. — Noter la division du cercle qui se trouve en regard du biseau de la règle. — Glisser entre le plan de verre et la pointe de la vis la lame à faces pa-

Digitized by Google

rallèles dont on veut connaître l'épaisseur. Il est évident que dans ces conditions l'instrument pivotera sur la pointe de la vis. La quantité dont il faudra tourner la vis pour retrouver le contact exact sur la surface supérieure de la lame, les trois autres pointes posant sur le plan, donnera l'épaisseur de la lame, à moins de $\frac{1}{1000}$ de millimètre près.

Si, par exemple, il a fallu tourner la vis d'un tour et qu'une des divisions du cercle C, qui donne les fractions, soit au point du repère, à la 480e division, l'épaisseur de la lame sera égale à $500 + 486 = \frac{980}{1000}$ de millimètre.

Donc l'épaisseur exacte de la lame sera $= \frac{980}{1000} = 0{,}98$.

DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR D'UNE LAME

Mode opératoire

Pour déterminer l'épaisseur d'une lame très mince, une feuille d'or par exemple; il n'est pas nécessaire de déterminer préalablement l'épaisseur du disque à faces parallèles, que l'on doit placer sur la feuille à mesurer afin de la préserver du contact de la pointe; il suffit, pour faire cette mesure, d'amener la pointe de la vis V en contact avec la partie supérieure du disque et de noter la division qui correspond au point de départ.

Enfin on interposera entre le plan et le disque la lame à mesurer, puis on ramènera la pointe de la vis en contact parfait avec la partie supérieure du disque; il est bien évident que le déplacement vertical de la vis, mesuré par le déplacement angulaire de la division qui correspondait au contact avant l'interposition de la feuille d'or, indiquera l'épaisseur cherchée, sans que la lame ait eu la moindre altération.

Remarque. — On peut se proposer d'étudier la vis du sphéromètre dans ses diverses régions.

Pour cela, on déterminera l'épaisseur d'une même plaque P : 1° en la posant directement sur le verre; 2° en interposant entre cette lame et le plan de verre de petits disques plans.

En général, on trouvera des nombres différents pour l'épaisseur e, soient h_1 h_2 h_3, etc. les épaisseurs trouvées. On aura un résultat offrant plus d'exactitude probable en prenant pour e la moyenne de ces déterminations.

De plus, en appelant p_1 p_2 p_3 les valeurs moyennes du pas de la vis dans chacune de ces régions, on doir avoir :

$$c = p_1 h_1 = p_2 h_2 = p_3 h_3, \text{ etc.}$$

Digitized by Google

Perfectionnement de M. Perreaux

Le point délicat dans la manœuvre du sphéromètre est d'amener la vis exactement au contact du plan de verre ou de la lame à mesurer.

Le perfectionnement introduit dans l'appareil de M. Perreaux facilite cette observation. La vis est creuse et contient une tige centrale terminée à sa partie supérieure par une pointe fixe. Tant que la vis descend, la tige centrale la suit dans son mouvement. Lorsque la pointe arrive au contact du verre, la tige s'arrête, et si on continue à faire descendre la vis, l'extrémité supérieure de la tige fait basculer un levier *a b c d* contre lequel elle s'appuie et l'on voit l'aiguille *c d* se déplacer sur le cadran A B. On remonte alors graduellement la vis jusqu'à ramener l'aiguille *c d* à sa position initiale.

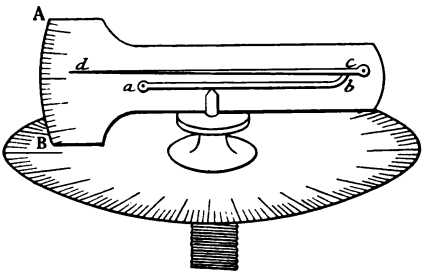


Fig. 14

PALMERS

On appelle ainsi des instruments qui, comme le sphéromètre, servent à déterminer de petites épaisseurs. Leur précision est en général beaucoup moindre que celle du sphéromètre, mais ils sont d'un maniement plus rapide et ont l'avantage d'être beaucoup plus portatifs.

La figure 15 représente une coupe de l'appareil courant

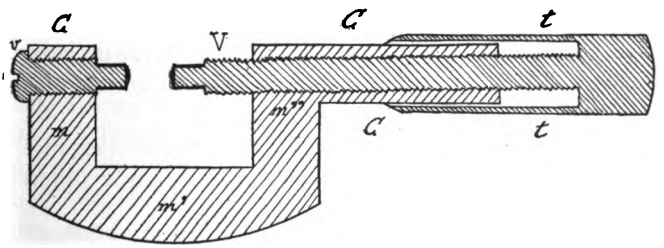


Fig. 15

que nous employons pour déterminer à $\frac{1}{20}$ de millimètre près le diamètre des fils.

Digitized by Google

Il est formé d'une pièce métallique $m\,m'\,m''$ d'un seul morceau dans lequel on a ménagé une ouverture rectangulaire, — afin de pouvoir prendre aussi l'épaisseur d'une lame à faces parallèles.

La partie coudée à angle droit C est taraudée de manière à former l'écrou de la vis micrométrique V, dont le pas est ordinairement de 1 millimètre.

Cette vis est fortement fixée à l'une de ses extrémités au fond du tube *t*, qui peut tourner à frottement doux sur la partie cylindrique de l'écrou, quand on le tourne dans un sens ou dans l'autre.

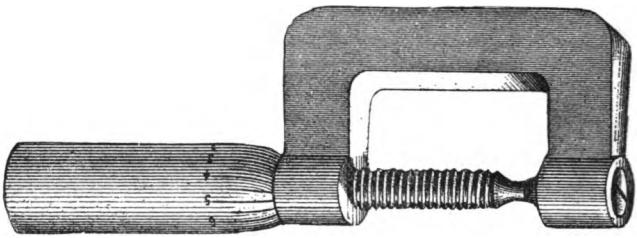


Fig. 16

L'extrémité libre de cette vis V est terminée par un petit cône à sommet en goutte de suif. Sur le côté opposé à CC se trouve une petite vis ordinaire *v* dont la partie saillante est terminée comme la vis micrométrique.

Les divisions qui correspondent au pas de la vis sont gravées sur la partie cylindrique de l'écrou; celles destinées à donner les fractions d'unité sont tracées sur le biseau du tube *t* à l'aide duquel on détermine le mouvement de rotation de la vis micrométrique.

Avant de faire une mesure on devra s'assurer que les zéros sont en parfaite coïncidence, lorsque l'extrémité de la vis micrométrique V vient buter sur celle de la vis ordinaire *v*.

Il est facile d'obtenir ces conditions en amenant l'extrémité de la vis ordinaire *v* en contact avec celle de la vis micrométrique, lorsque les zéros ont été placés en coïncidence.

Pour faire une mesure de diamètre d'un fil on règle la position de la vis micrométrique de façon à ce que le fil passe exactement entre les deux cônes. Le diamètre de ce fil sera égal au nombre de tours et de fractions de tour ou bien égal à la fraction de tour dont on fait tourner la vis. Or, comme le pas

Digitized by Google

de cette vis est de 1 millimètre et que le biseau du tube porte vingt divisions, on aura dans ces conditions le diamètre cherché à $\frac{1}{20}$ de millimètre près.

Enfin, quand on aura intérêt à mesurer à $\frac{1}{100}$ et même à $\frac{1}{1000}$ de millimètre le fil dont on veut connaître le diamètre, on pourra, sans avoir recours au sphéromètre, employer le modèle de Palmers perfectionné par M. Riottot.

Dans cet instrument de précision, représenté figure 17, le déplacement du cylindre D′ est produit par le mouvement de rotation du bouton A. Ce mouvement peut s'effectuer dans un sens ou dans l'autre à l'aide du bouton A, qui tourne fou dans le sens inverse de la graduation lorsque l'extrémité conique du cylindre mobile arrive en contact avec le fil qui bute sur l'extrémité du cône fixe D.

Dans ces conditions, le ressort intérieur qui solidarise la vis au bouton d'entraînement, limite seul la pression que le cône C exerce sur la partie du fil qu'il touche, puisque au moindre contact, le bouton d'entraînement tourne fou; de plus, ce ressort a été préalablement réglé de telle façon, qu'il ne puisse exercer une pression capable de détériorer le fil ou la lame dont on veut déterminer le diamètre ou l'épaisseur.

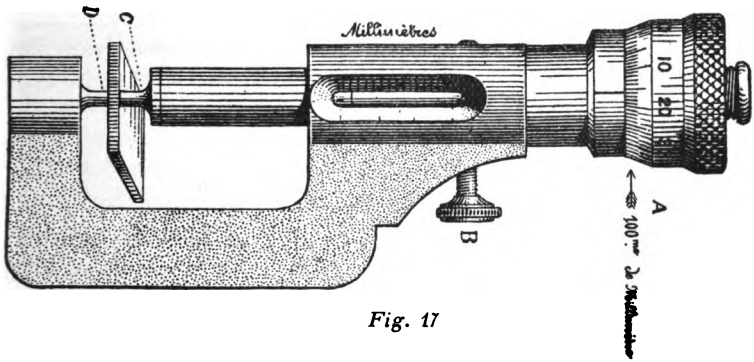


Fig. 17

Les divisions correspondant au pas de la vis sont gravées sur le biseau de l'ouverture pratiquée dans la partie cylindrique du support; celles qui donnent le centième de ces unités sont tracées sur le biseau du bouton d'entraînement B.

Enfin, sur la partie cylindrique qui termine le support fixe, on a remplacé le trait de repère par un vernier donnant le $\frac{1}{10}$ de l'une quelconque de ces dernières divisions. On pourra donc ainsi, avec cet instrument, faire des mesures à $\frac{1}{1000}$ de millimètre près.

Digitized by Google

MESURES DE DIAMÈTRES ET DES ÉPAISSEURS

A L'AIDE DU PALMER PERFECTIONNÉ

Mode opératoire

Note. — On se sert souvent, pour mesurer le diamètre intérieur des tubes d'un appareil représenté par la figure 18 et qui

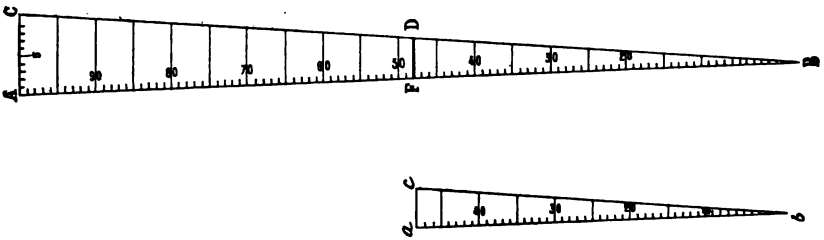


Fig. 18

est basé sur la considération des triangles semblables.

Supposons que la longueur de l'appareil soit de 100 millimètres, la hauteur AC de 10 millimètres. Si, en l'introduisant dans le tube, on est arrêté à la division 40, le diamètre cherché est

$$10 \text{ m/m} \times \frac{40}{100} = 4 \text{ m/m}$$

NIVEAU A BULLE D'AIR

Le niveau à bulle d'air consiste en un tube de verre dont on a usé à l'émeri la surface intérieure, de manière que la section de cette surface, par un plan passant par l'axe du tube soit un arc de cercle de très grand rayon; on le remplit d'eau ou d'alcool, ou encore mieux d'éther, en laissant une grande bulle d'air. Sur le tube sont marquées des divisions (*fig. 19*), sauf au milieu, où deux traits distants à peu près de la largeur de la bulle forment les repères du niveau.

Fig. 19

Le tube ainsi constitué, est enfermé dans une gaîne métallique, évidée de façon à laisser voir la bulle et les divisions du tube et placé

Digitized by Google

sur un plan métallique dressé à l'émeri. La gaîne est mobile autour d'un axe *o* et peut être déplacée de quantités très petites au moyen d'une vis micrométrique.

Mode opératoire

Il faut d'abord régler le niveau. Pour cela, après avoir observé la position de la bulle, on retourne le niveau bout pour bout. Si la position de la bulle a changé, par rapport à l'observateur, on agit sur la vis de façon à la ramener de la moitié de son déplacement. On recommence plusieurs fois jusqu'à ce que le retournement amène la bulle rigoureusement dans la même position par rapport à l'observateur. L'instrument est alors réglé. On peut s'en servir à présent pour vérifier l'horizontalité d'un plan.

A cet effet, on place le niveau sur le plan successivement dans deux directions rectangulaires. Si le plan est bien horizontal, la bulle doit rester entre les repères.

Remarque. — Dans le modèle représenté par la figure 20, le réglage a été fait d'avance par le constructeur.

CATHÉTOMÈTRE

Le cathétomètre, inventé par Dulong et Petit, et qui sert à mesurer des différences de niveaux, est une application à la fois du vernier et de la vis micrométrique.

Il se compose d'une solide colonne de fonte (*fig. 20*) portée par un trépied à vis calantes, muni de niveaux à bulle d'air et qui doit être verticale. Cette colonne supporte un manchon de cuivre qui peut tourner facilement sur un axe, formé par une pointe mousse s'appuyant sur la partie supérieure de la colonne.

Le manchon porte une règle divisée en millimètres, le long de laquelle peut glisser un équipage mobile formé de deux curseurs *c* et *c'*. Le curseur inférieur *c* peut se fixer à la règle par une vis de serrage V.

Le curseur supérieur *c'* est relié au premier par une vis micrométrique V' servant de vis de rappel. Ce curseur *c'* porte, en outre, le système optique.

Ce système optique est constitué par une lunette astronomique à réticule micrométrique reposant sur les colliers *b e* dressés d'une fourchette F, mobile autour d'un axe horizontal *o* et que l'on peut déplacer au moyen de la vis V'', qui vient buter contre la languette L servant de levier.

Digitized by Google

La lunette est en outre munie d'un niveau à bulle d'air que l'on règle de façon à ce que la ligne de ses repères soit parallèle à l'axe géométrique de la lunette.

Enfin le curseur c′ porte une fenêtre à biseau laissant voir les divisions de la règle, et un vernier généralement au $\frac{1}{50}$ permet d'évaluer un déplacement du cinquantième de millimètre.

Mode opératoire

Réglage de l'instrument :

1° On commence par faire coïncider les axes géométrique et optique de la lunette. Pour cela, on vise un point déterminé et l'on tourne la lunette autour de son axe. Si les deux axes coïncident, l'image du point visé se trouvera toujours sur la croisée des fils du réticule. Si ce n'était pas, on changerait la position de ces fils, ce qui est possible, grâce à des vis disposées à cet effet sur l'oculaire.

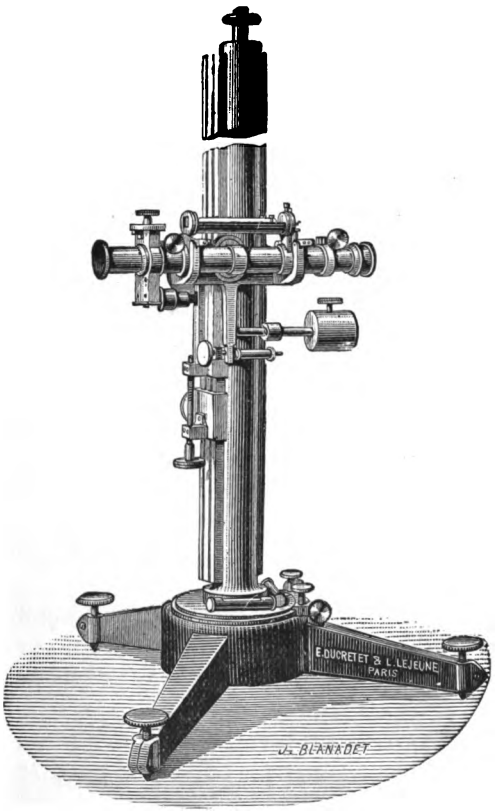


Fig. 20

2° Parallélisme de l'axe de la lunette et de la ligne des repères de niveau.

On amène la bulle entre ses repères en faisant osciller le système, puis on retourne la lunette bout pour bout. Si la bulle s'est déplacée, on agit sur la vis du niveau de façon à le ramener de la moitié de son déplacement. En général, il faut recommencer plusieurs fois ce réglage avant d'arriver exactement à l'immobilité de la bulle.

Digitized by Google

3° Il faut que l'axe de la lunette soit perpendiculaire à l'axe de rotation du manchon. Ce réglage se fait au moyen du niveau, en faisant tourner le système de 180°. Si la bulle a bougé, on fait mouvoir la vis V″ de manière à la ramener de la moitié de son déplacement.

L'appareil étant ainsi réglé, pour faire une mesure de différence de niveau de deux points, on vise l'un des points, c'est-à-dire qu'on amène ce point à coïncider avec la croisée des fils du réticule et cela en se servant d'abord de la vis V pour une visée approchée que l'on termine au moyen de la vis V′. On note alors la position du zéro du vernier.

On fait une deuxième lecture correspondant au deuxième point. La différence donne la hauteur cherchée.

Nous appliquerons plus loin le cathétomètre à la mesure d'une hauteur barométrique.

MESURE DES ANGLES

Mesure des angles par la réflexion d'un faisceau lumineux sur un miroir mobile.

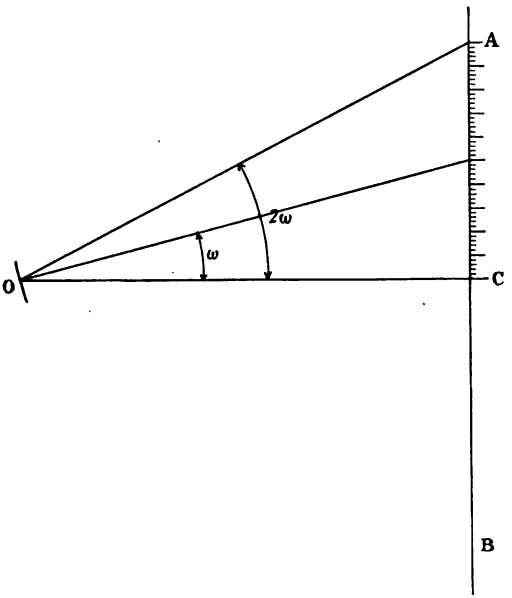


Fig. 21

Digitized by Google

Deux méthodes peuvent être employées dans cette mesure, l'une dite *objective*, l'autre dite *subjective*.

Dans la méthode *objective*, due à lord Kelvin, on dispose une règle horizontale divisée AB; au centre est une fente *c* fortement éclairée par derrière (*fig. 21*). Le faisceau de rayons lumineux vient se réfléchir sur un miroir concave *o* porté par le corps qui se déplace. L'image de la fente viendra se faire en un point A de l'échelle divisée. Appelons ω l'angle dont on a tourné le miroir. On a :

$$tg\, 2\omega = \frac{AC}{OC}.$$

Dans la méthode *subjective*, due à Poggendorff et à Gauss, on vise avec une lunette L dans un petit miroir plan mobile l'image réfléchie des divisions d'une règle AB placée horizontalement un peu au-dessus ou un peu au-dessous de l'objectif de la lunette (*fig. 22*).

Ici, comme tout à l'heure, on a :

$$tg\, 2\omega = \frac{AC}{OC}.$$

Comme appareils optiques fondés sur l'emploi de la mé-

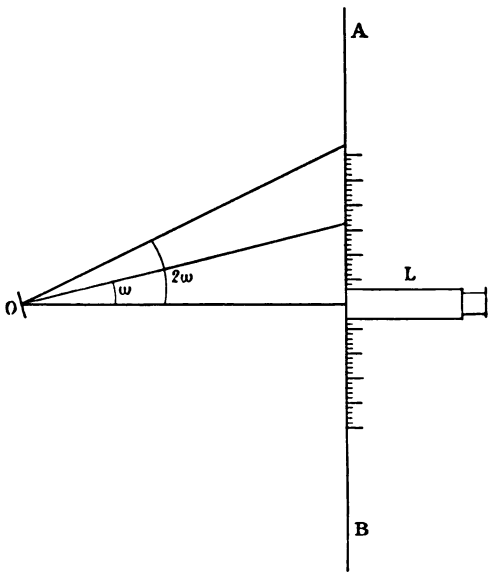


Fig. 22

Digitized by Google

thode objective, nous citerons l'appareil de Thomson, représenté figure 23, et celui de Carpentier, dont nous ferons fréquemment usage dans nos mesures électriques, et qui est re-

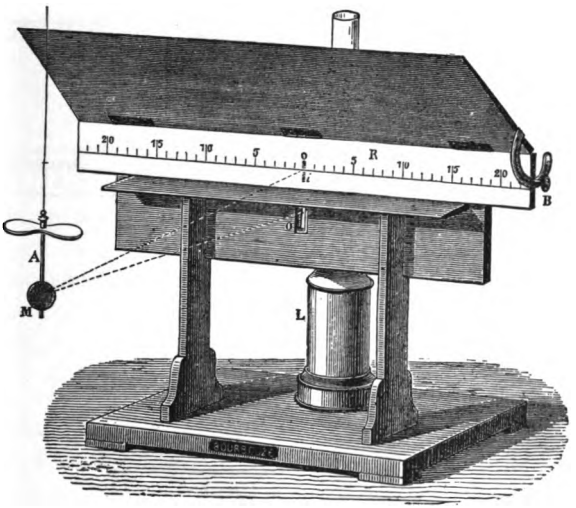


Fig. 23

présenté par la figure 24, on voit à part la mire, constituée par une fente rectangulaire au milieu de laquelle est tendu un fil métallique.

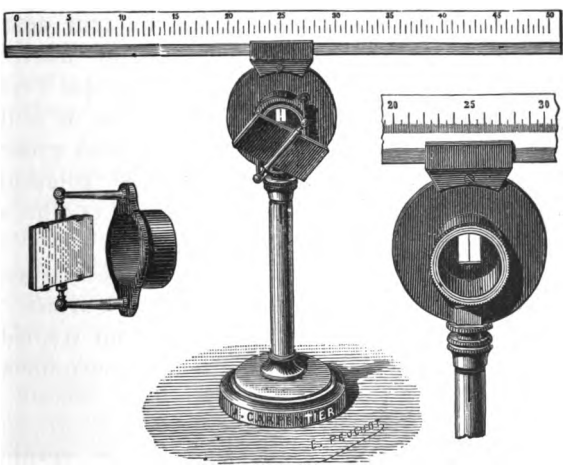


Fig. 24

Digitized by Google

Parmi les appareils fondés sur la seconde méthode, nous ne citerons que celui de M. Bourbouze, représenté figure 25, et celui de M. Mascart.

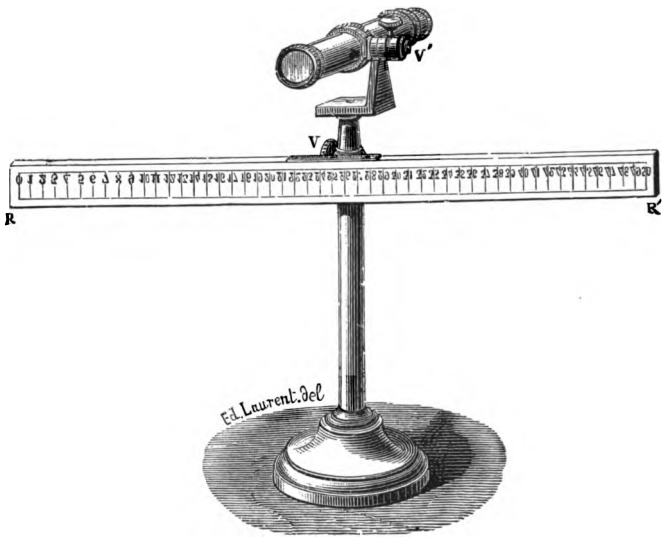


Fig. 25

Dans l'appareil de M. Bourbouze, une lunette, placée en haut d'une colonne, peut tourner autour d'un axe horizontal et être fixée dans une position inclinée quelconque; de plus, elle peut être élevée ou abaissée et placée à une hauteur déterminée à l'aide de la vis de serrage V. L'échelle RR′ est fixe. On place l'appareil par rapport au miroir, de telle sorte que l'échelle soit un peu au-dessous. On règle ensuite la position de la lunette.

Dans l'appareil de M. Mascart, la lunette peut prendre deux mouvements de rotation autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal.

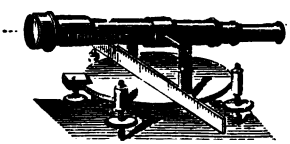


Fig. 26

Elle est indépendante de l'échelle. Celle-ci, qui est en ivoire, est montée sur un trépied et peut être montée ou descendue au moyen d'une vis.

Digitized by Google

VÉRIFICATION DES LOIS DE LA CHUTE DES CORPS

MACHINE D'ATWOOD

Les principales lois de la chute des corps que nous avons à étudier dans cette manipulation sont contenues dans les deux formules suivantes :

$$e = \tfrac{1}{2} g t^2,$$
$$v = gt.$$

La première montre que les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

La deuxième fait voir que les vitesses sont proportionnelles aux temps.

La vérification de ces lois ne peut se faire directement, parce que les corps abandonnés à eux-mêmes tombent avec une très grande vitesse. On se trouve donc dans l'impossibilité de mesurer les espaces parcourus en chute libre.

On parvient à les vérifier à l'aide de la machine d'Atwood, avec laquelle ou peut ralentir l'action de la pesanteur sans en changer la nature et, par suite, rendre facile la mesure des espaces parcourus dans des temps égaux.

M. Bourbouze a construit pour cette manipulation une machine simple, à déclanchement automatique (*fig.* 27).

Elle se compose d'une roue à gorge R qui peut librement tourner, sur pivots, entre deux supports fixés sur une plateforme qui est maintenue à l'extrémité supérieure d'une règle divisée. La partie inférieure de cette règle repose sur un pied triangle muni de vis calantes $v\ v'\ v''$. Deux colonnes métalliques, fixées parallèlement à cette règle assurent la stabilité de l'instrument.

Deux masses égales M M′ sont accrochées à chaque extrémité d'un fil fin qui s'enroule dans la gorge de la poulie R. L'équilibre de ces deux masses existera donc ainsi dans toutes leurs positions relatives.

Digitized by Google

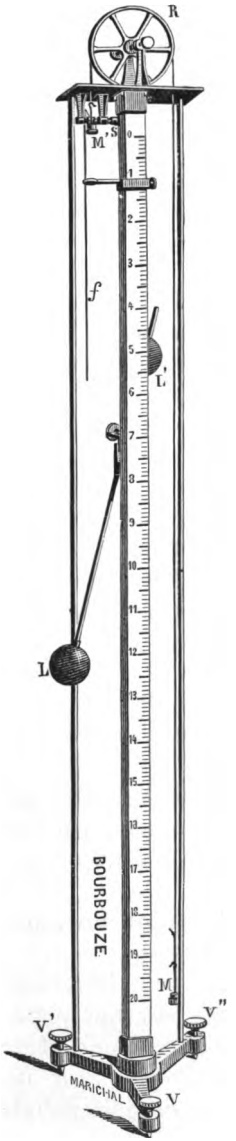


Fig. 27

Deux curseurs mobiles peuvent être fixés en un point quelconque de la règle à l'aide de vis de pression; l'un est plein, l'autre annulaire. Ce dernier est destiné à arrêter le poids additionnel qui est disposé pour la loi des vitesses.

Le côté opposé de la face divisée porte un balancier à contre-poids lenticulaire mobile L. Cette disposition permet de régler la durée de temps pour un espace déterminé.

Sur le même côté de cette règle est fixé un axe vertical qui peut tourner sur pivots; à chaque extrémité de cet axe se trouve vissé un doigt. Ces doigts forment entre eux un angle d'environ 80°.

Celui fixé à la partie supérieure est destiné à maintenir au repos la palette qui soutient la masse M′ plus le poids additionnel. Celui de la partie inférieure sert à produire le déclanchement qui se fait lorsque la tige du balancier le rencontre à la fin de la première oscillation.

La masse M′ plus le poids additionnel sont maintenus dans un plan horizontal correspondant au zéro de l'échelle par une seconde palette S fixée à l'autre extrémité de l'axe horizontal qui porte la première et qui vient reposer sur le doigt supérieur de l'axe vertical.

Enfin un cordon, attaché au levier qui se trouve dans le prolongement de la palette qui supporte le poids, permet de ramener cette dernière au point de départ après chaque expérience.

A l'aide de ces dispositions, on peut être assuré que le mouvement du mobile, ainsi que celui du pendule, commenceront au même moment.

Avant de faire une expérience, on devra s'assurer que la

Digitized by Google

masse M′ passe exactement au centre du curseur annulaire que l'on aura placé au bas de la règle divisée. On arrive facilement à ce résultat à l'aide des vis calantes V V′ V″.

VÉRIFICATION DE LA LOI DES ESPACES

Mode opératoire

Soulever la masse M′ avec son poids additionnel. — Faire mouvoir le levier du petit axe horizontal à l'aide du cordon *f* de manière à amener la palette qui doit les supporter dans le plan horizontal correspondant au zéro de l'échelle. — Faire tourner l'axe vertical de façon que le doigt fixé à sa partie supérieure vienne se placer sous la deuxième palette S et maintenir ainsi tout le système au repos.

Placer le curseur plein à la 10ᵉ division de la règle (*fig. 28*). — Ecarter la lentille du pendule de sa position d'équilibre. — L'abandonner à lui-même; à ce moment, on entend un petit bruit sec qui se produit une unité de temps avant le départ du mobile.

A la fin de la première oscillation, la tige du pendule pousse le doigt inférieur de l'axe vertical et le déclanchement se produit au commencement de la deuxième oscillation.

Si le bruit que le corps produit en tombant sur le curseur plein ne coïncide pas avec le troisième bruit produit par le ressort du balancier, on devra régler la position de la lentille L′ de manière que les deux bruits se confondent après la fin de la première unité de temps de chute.

L'espace parcouru par le mobile étant de 10 centimètres pour la première unité de temps, on constatera qu'en plaçant successivement le curseur plein aux distances 4, 9, 16, le mobile viendra le frapper à la fin de la deuxième, de la troisième, de la quatrième oscillation du pendule. Ce qui démontre que les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir depuis l'origine du mouvement et que les espaces parcourus pendant des temps successifs et égaux sont entre eux comme les nombres impairs 1, 3, 5, 7. — La figure 28 indique les positions qu'il faut donner au curseur pour vérifier la loi énoncée ci-dessus.

Digitized by Google

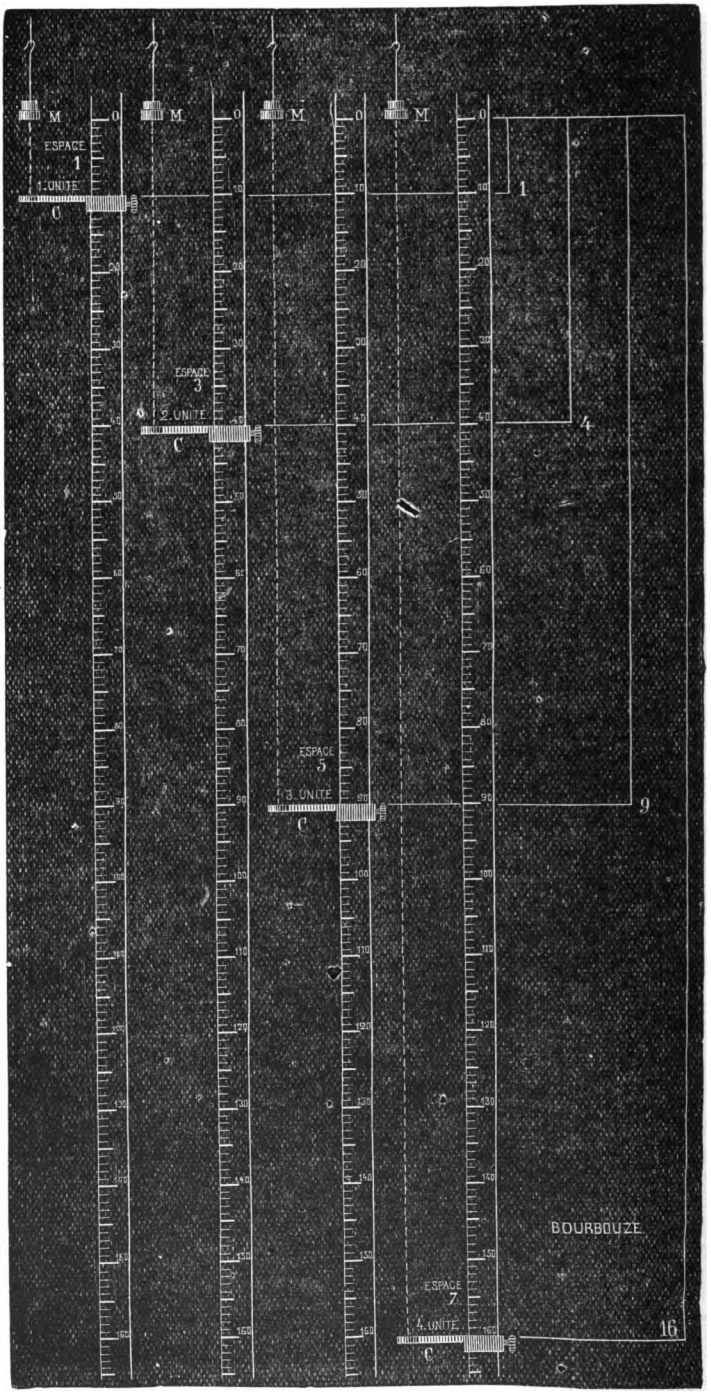


Fig. 28

Digitized by Google

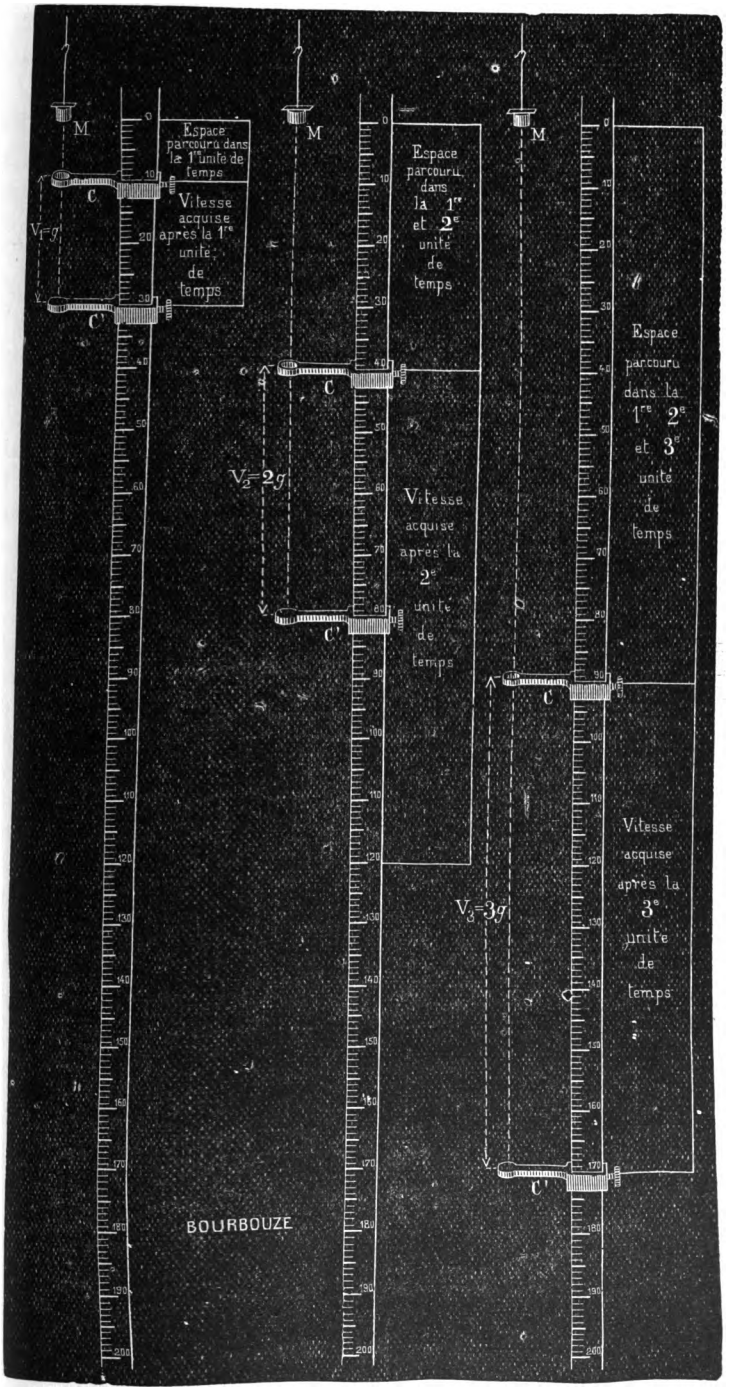


Fig. 29

Digitized by Google

VÉRIFICATION DE LA LOI DES VITESSES

Quand on veut vérifier la loi des vitesses, on arrête, à l'aide du curseur annulaire C le poids additionnel P à un moment quelconque, à partir duquel le mouvement devient uniforme.

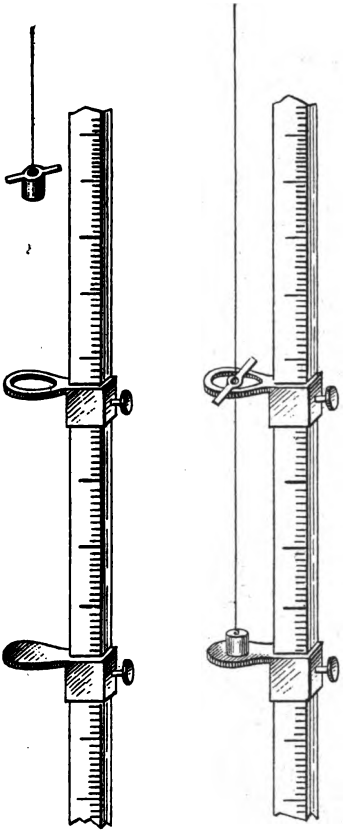


Fig. 30

Si l'uniformité s'est produite, par exemple, après la 20e division pour la première unité de temps, la distance comprise entre cette position et le zéro de l'échelle est juste la moitié de la distance comprise entre le curseur annulaire et le curseur plein C′, sur lequel vient frapper la masse M′ après la deuxième unité de temps.

En prenant pour mesure de la vitesse, dans le mouvement uniforme, l'espace parcouru de C en C′ dans l'unité de temps, l'espace sera double pour deux unités, triple pour trois, et ainsi de suite pour les unités suivantes. Ce qui prouve bien que le mouvement, d'accéléré qu'il était, est devenu uniforme. Ce que l'on exprime par la formule $e = Vt$, qui indique que, dans e mouvement uniforme, les espaces sont proportionnels aux temps.

La figure montre les faits que nous venons d'indiquer.

Si l'on place le curseur annulaire C, de telle sorte que l'action de la force accélératrice se trouve supprimée après la deuxième unité de temps, on constatera que la vitesse acquise est double de ce qu'elle était à la fin de la première.

On a ainsi la vitesse du corps $M' + p$ au bout des deux premières unités de temps. Pour la déterminer après la troisième, on devra, au début, s'arranger de façon que l'espace parcouru

Digitized by Google

d'un mouvement accéléré dans la première unité de temps soit de 10 centimètres.

La figure montre que dans ces conditions la distance parcourue d'un mouvement uniforme après cette première unité de temps est 20 centimètres, que nous pouvons représenter par $V_1 = g = 20$.

Pour constater que $V_2 = 2\,g$, il faudra placer le curseur C à la division 40, de manière à arrêter le poids additionnel à la fin de la deuxième unité de temps et le curseur plein à la 80e division.

On aura ainsi $80 - 40 = 40 = 2\,g$.

Pour la troisième, le curseur annulaire sera placé à la 90e division et le curseur plein à la 150e, ce qui donne $150 - 90 = 60 = 3\,g$.

TEMPS de la chute	ESPACE parcouru d'un mouvement varié	ESPACE parcouru uniformément dans un temps égal	VITESSE acquise à la fin de chaque unité
1re unité.	1	2	2
2e »	4	8	4
3e »	9	18	6
4e »	16	32	8
5e »	25	50	10

MÉTHODE GRAPHIQUE

L'appareil que M. Bourbouze a construit pour l'étude des lois de la chute des corps par la méthode graphique se compose d'une roue à gorge R et d'un cylindre C montés solidairement sur le même axe, qui peut librement tourner sur pivots. Deux masses égales M M′ sont attachées aux extrémités d'un fil fin qui passe sur cette roue à gorge.

Une lame vibrante L, en acier, est maintenue dans une pince articulée fixée à l'extrémité d'une tige *t* glissant dans une pièce disposée de telle façon qu'elle puisse se mouvoir parallèlement à l'axe du cylindre. Elle est en outre munie de deux vis de pression à l'aide desquelles on donne à cette tige une position invariable pendant la durée d'une expérience. Cette disposition permet, quelle que soit la longueur de la lame, de faire vibrer

Digitized by Google

son extrémité supérieure toujours devant la même génératrice

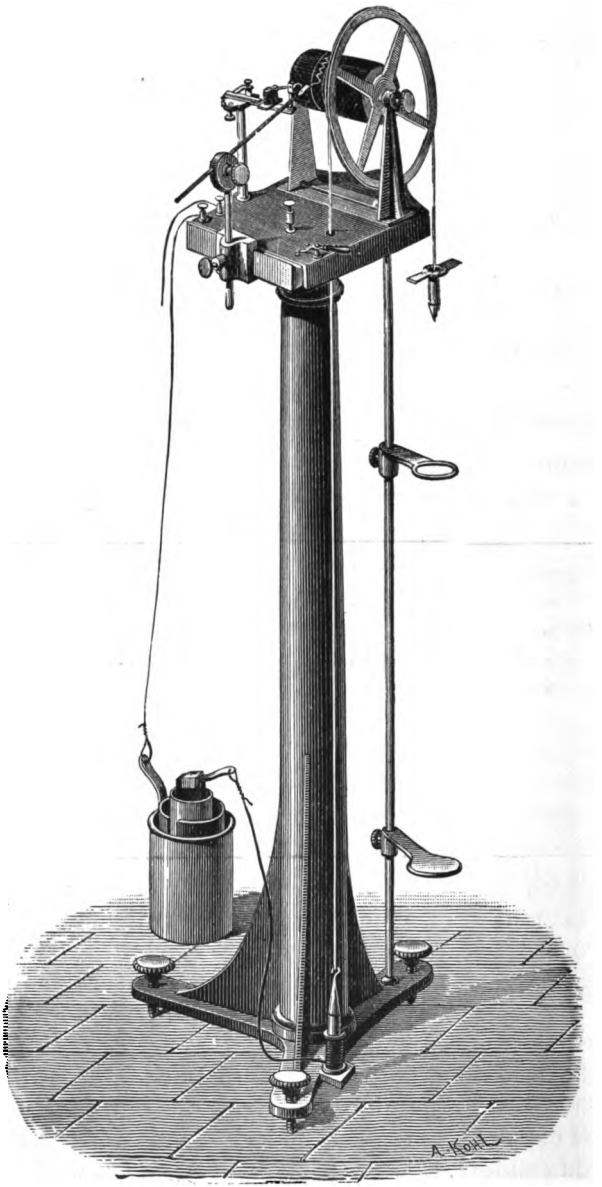


Fig. 31

du cylindre. Un petit électro-aimant *e*, placé devant la lame, la maintient écartée de sa position d'équilibre. Le courant qui

Digitized by Google

le traverse, passe aussi dans un autre placé à la partie inférieure, sur lequel s'appuie la masse M fixée à l'extrémité du fil. Si l'on vient à supprimer le courant, après avoir chargé la masse M' d'un poids additionnel, l'équilibre est détruit. Le mouvement vibratoire de la lame et du cylindre commenceront rigoureusement au même instant.

Quand on voudra faire une expérience, on devra s'assurer que la masse M' passe exactement au centre du curseur annulaire, que l'on aura placé au bas de la règle divisée. On arrive facilement à ce résultat à l'aide des vis calantes fixées à la base de la colonne en fer.

Mode opératoire

Couper des bandes de papier blanc de grandeur suffisante pour avoir dans toute la longueur du cylindre un recouvrement de quelques millimètres. — Envelopper ce cylindre d'une de ces feuilles; — la fixer avec de l'eau fortement gommée; la recouvrir, quand elle est sèche, d'une couche légère de noir de fumée en plaçant dessous une flamme fuligineuse.

Régler la pointe, qui doit être très flexible, de manière à ce que la partie libre touche légèrement le papier enfumé et qu'elle y laisse par suite la trace du mouvement vibratoire qu'on lui a fait accomplir.

Faire passer le courant de la pile dans les deux petits électro-aimants à l'aide de l'interrupteur placé sur la plate-forme de la machine. L'action attractive de ces électro-aimants aura, comme nous l'avons déjà dit, pour effet de maintenir au repos la lame écartée de sa position d'équilibre, ainsi que le système des deux masses, malgré l'addition du poids additionnel p.

L'appareil ainsi disposé, on constatera, lorsque les deux mouvements de la lame et du cylindre commenceront à se produire par suite de la suppression du courant, que la pointe trace sur le papier une ligne sinueuse qui permet de connaître la nature du mouvement du cylindre et par suite des contrepoids.

En effet, les vibrations de la lame étant isochrones, on peut prendre pour unité de temps la durée d'un certain nombre de ces vibrations. De sorte que, pour avoir la loi des espaces parcourus pendant des instants successifs et égaux, il suffit de comparer des points tracés par la lame :

1° A l'origine et à la fin de la n^e vibration;

Digitized by Google

2° A la fin de la n^e et à la fin de la 2 n^e;
3° A la fin de la 2 n^e et à la fin de la 3 n^e;
etc.

L'unité de temps est la durée de trois vibrations doubles.

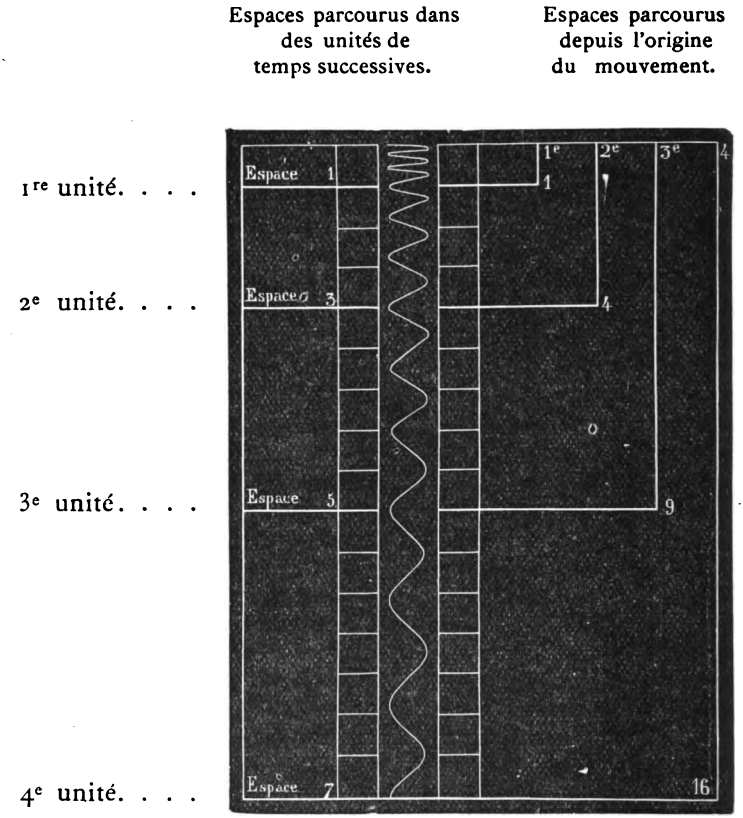


Fig. 32

Dans la figure 32, on a mesuré les distances :
1° De l'origine à la fin de la sixième vibration simple;
2° De ce dernier point à la fin de la douzième;
3° De ce point à la fin de la vingt-quatrième, etc.

On voit que les distances sont entre elles comme les nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc.; par conséquent que les espaces parcourus depuis l'origine du mouvement sont comme les nombres 1, 4, 9, 16.

Digitized by Google

Quand on veut vérifier la loi des vitesses, on arrête, à l'aide du curseur annulaire C (*fig. 31*) le poids additionnel *n*, à un moment quelconque, à partir duquel le mouvement devient uniforme, et on voit alors que les distances des points marqués par la lame au commencement des vibrations successives vont en croissant; mais ensuite ces distances deviennent égales; ce qui prouve bien que le mouvement du cylindre, d'accéléré qu'il était, devient uniforme.

On voit aussi que, si l'uniformité s'est produite après *n* vibrations, la distance des points marqués à l'origine et à la fin de la n^{me} vibration est juste la moitié de la distance des points marqués à la fin de la n^{me} vibration et à la fin de la 2 n^{me}.

La figure 33 montre les deux faits que nous venons d'indiquer. L'uniformité de mouvement a lieu après douze vibrations simples.

Origine du mouvement accéléré . . . . . .

Fin du mouvement accéléré et commencement du mouvement uniforme, douze vibrations. . .

Fin du mouvement uniforme, douze vibrations . . . . . .

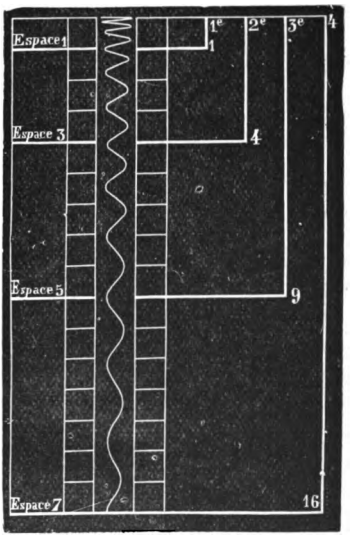


Fig. 33

Cela posé, si l'on veut montrer que les vitesses sont proportionnelles au temps, on arrêtera le poids après un nombre *n* de vibrations, comme nous venons de l'indiquer, et l'on prendra avec un compas la distance à la fin de la n^{e} vibration et de la 2 n^{me}, que nous pouvons représenter par $V_1 = g$ (*fig. 34*).

Il suffira, pour constater que $V_2 = 2g$, de descendre le curseur pour arrêter le poids additionnel à la fin de la deuxième

Digitized by Google

unité de temps (*fig. 35*) et de comparer les distances pour un même nombre de vibrations.

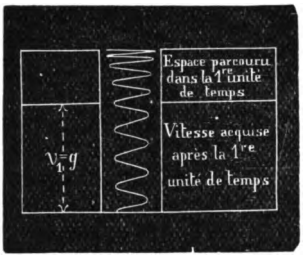


Fig. 34

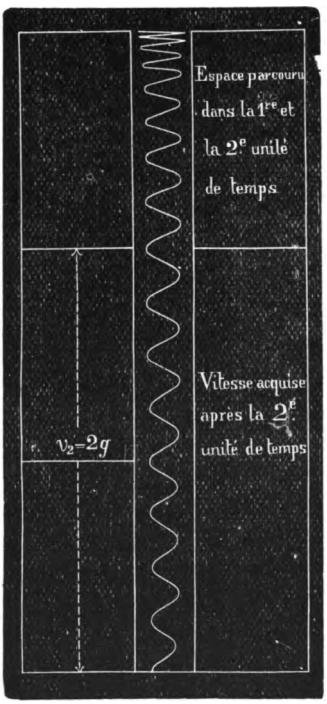


Fig. 35

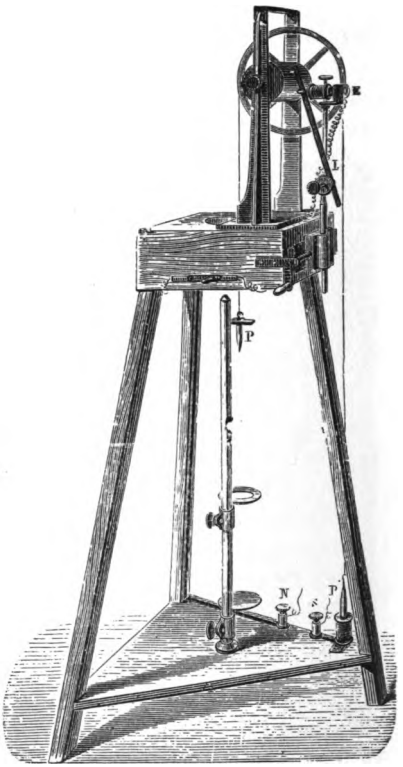


Fig. 36

La figure 36 représente l'appareil qui a été présenté à l'Académie des sciences, le 6 janvier 1862, par M. Desprez, membre de l'Institut.

Dans le modèle que l'on construit actuellement, le déclanchement se fait par la fermeture du courant. Cette nouvelle disposition permet d'obtenir d'une façon rigoureuse la simultanéité des deux mouvements, quelle que soit la nature du fer des électro-aimants.

Digitized by Google

BALANCE — PESÉES

DÉTERMINATION DU POIDS D'UN CORPS PAR LA MÉTHODE DES DOUBLES PESÉES

Pour obtenir d'une manière exacte le poids d'un corps, on doit avoir recours au moyen connu sous le nom de méthode des *doubles pesées*. Cette méthode, qui est due à Borda, est la seule qui, dans la pratique, permette de faire des pesées très exactes même avec une balance dont les bras du fléau ne seraient pas rigoureusement de même longueur, pourvu toutefois qu'elle puisse satisfaire aux conditions de *sensibilité* que doit avoir une bonne balance.

La *sensibilité* d'une balance dépend : 1° de la mobilité du fléau autour de son axe de suspension; 2° de la distance du centre de gravité au centre de suspension; 3° de la longueur des bras du fléau, ainsi que de son poids.

On reconnaît qu'une balance satisfait à ces conditions lorsque les oscillations du fléau se font avec une grande lenteur et qu'il trébuche sous l'action d'un faible excès de poids (1).

Enfin, il faut avoir soin, dans l'usage d'une balance de précision, de proportionner à la force du fléau les masses dont on charge les plateaux.

MÉTHODE DES DOUBLES PESÉES

Cette méthode consiste à placer sur l'un des plateaux d'une balance le corps dont on veut connaitre le poids, puis on lui fait équilibre en mettant dans le plateau opposé soit des poids ordinaires, soit de la grenaille de plomb. L'équilibre étant établi, on remplace le corps par des poids marqués en quantité suffisante pour rétablir le même équilibre. Ces poids représenteront évidemment le poids exact du corps dans l'air, puisque ces poids et le corps ont successivement fait équilibre à la même tare.

Nous n'avons pas à entrer dans les détails de constructions des balances de précision proprement dites. Elles doivent être toutes

(1) On doit considérer qu'une balance est suffisamment sensible lorsque son fléau trébuche à $\frac{1}{50000}$ du poids dont il est chargé.

Digitized by Google

construites de manière à remplir les conditions de sensibilité que nous venons d'indiquer.

Les balances destinées à la détermination exacte des poids des corps ne doivent différer que par les dimensions et la forme qui devront nécessairement changer suivant l'usage auquel on les destine.

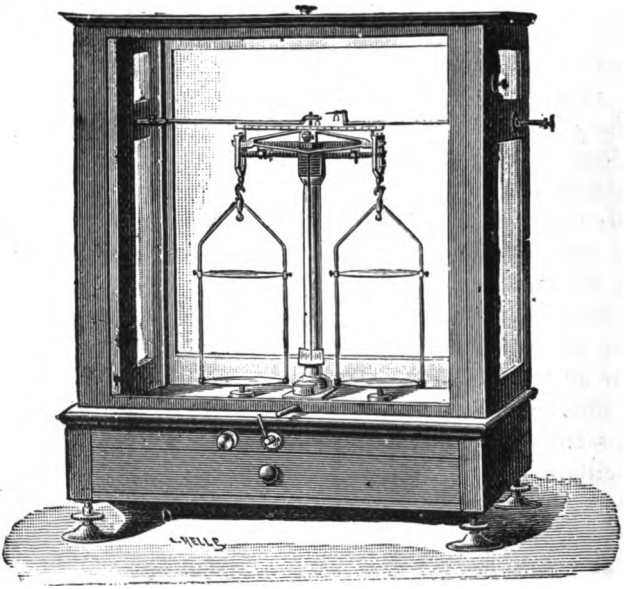


Fig. 37

La figure 37 montre un modèle de balance de précision

MESURE DE LA SENSIBILITÉ DE LA BALANCE

On commence par étudier la balance qui doit servir à déterminer les densités. Nous supposons cette balance réglée, c'est-à-dire que toutes les vérifications mécaniques telles que l'horizontalité du support, l'égalité des bras de levier, l'équilibre au zéro lorsque la balance est au repos, etc., ont été faites.

On étudie ensuite la déviation subie par l'aiguille de la balance pour une surcharge de $0^g,001$, les plateaux étant chargés de poids variables. Cette déviation, mesurée en divisions de l'échelle devant laquelle se déplace l'extrémité de l'aiguille, mesure la sensibilité. En général, cette sensibilité varie avec la charge mise dans les plateaux et diminue quand cette charge augmente.

Digitized by Google

L'étude de cette sensibilité permet de connaître la précision que l'on est en droit d'attendre des pesées effectuées et renseigne sur le plus ou moins d'opportunité des corrections.

Mode opératoire

La balance étant réglée, on met dans l'un des plateaux un poids marqué, soit, par exemple, 50 grammes.

On équilibre avec de la grenaille de plomb ou des poids marqués.

En réalité, on n'attend jamais que l'aiguille du fléau soit devenue complètement immobile.

On utilise la division devant laquelle se déplace l'aiguille.

On note successivement trois élongations de l'extrémité de l'aiguille, c'est-à-dire qu'on observe les écarts qu'elle fait avec la verticale, deux à gauche par exemple et un à droite. Soient $d_1 d_2 d_3$ les divisions lues. On fait la somme $d_1 + 2\,d_2 + d_3$ et on divise par 4 la valeur $\frac{d_1 + 2\,d_2 + d_3}{4}$ donne avec une grande approximation la position de l'aiguille à l'état d'équilibre. On note cette valeur, soit D_1.

On ajoute à la tare une surcharge de 0g,001. On recommence la même série d'observations. Soit D_2 la valeur trouvée.

$D_2 - D_1$ mesure la sensibilité de la balance pour une charge de 50 grammes.

On recommencera la même détermination en faisant varier la charge.

On pourra ensuite construire une courbe en portant sur un axe horizontal des longueurs représentant les charges, et sur un axe vertical des longueurs représentant les valeurs de la sensibilité de la balance pour ces différentes charges.

Il est absolument indispensable, avant de se servir d'une balance, de s'assurer qu'elle est réglée et d'étudier sa sensibilité. Il faut aussi contrôler les poids marqués en les comparant entre eux, après avoir comparé l'un d'eux ou l'ensemble avec un poids étalon.

Digitized by Google

MESURE DES DENSITÉS

On appelle *densité* d'un corps solide ou liquide le rapport du poids d'un certain volume de ce corps pris à 0° au poids d'un égal volume d'eau distillée à 4°.

Il ne faut pas confondre la densité, qui est un rapport de poids indépendant du lieu d'observation avec le ***poids spécifique,*** qui est le poids de l'unité de volume et qui est variable d'un lieu à un autre, avec l'accélération de la pesanteur.

MÉTHODE DE LA BALANCE HYDROSTATIQUE

La détermination de la densité des corps solides ou liquides

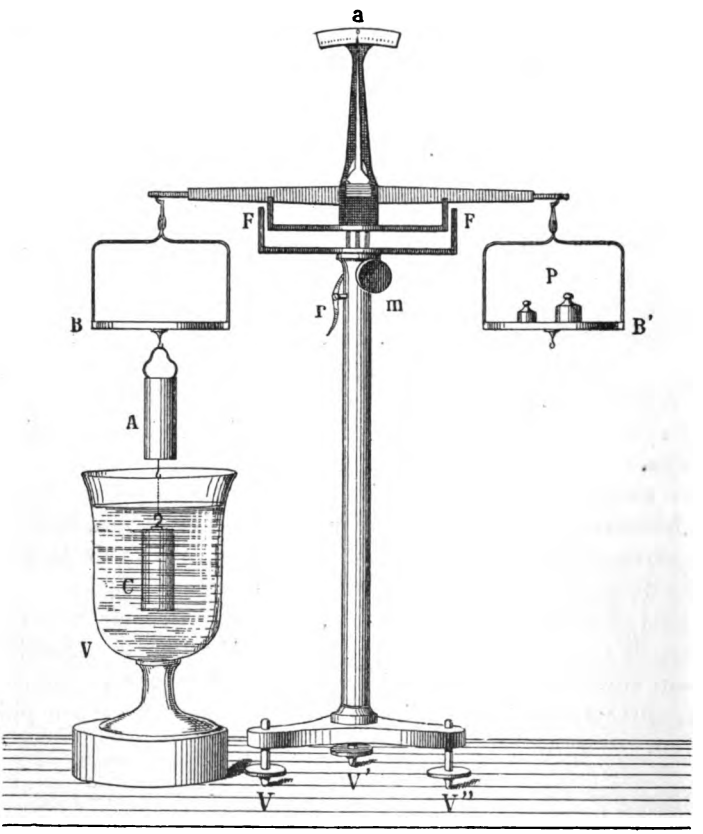


Fig. 38

par cette méthode repose sur un principe qui est dû à Archi-

Digitized by Google

mède, et que l'on peut énoncer de la manière suivante : « Tout corps plongé dans un liquide éprouve, de la part de ce liquide, une poussée verticale dirigée de bas en haut et égale au poids du volume qu'il déplace ».

Pour démontrer expérimentalement ce principe, on suspend à l'un des bras de la balance hydrostatique un cylindre creux A, sous lequel on attache un autre cylindre C qui peut remplir exactement la capacité du premier.

Après avoir fait la tare, on fait plonger le cylindre dans l'eau

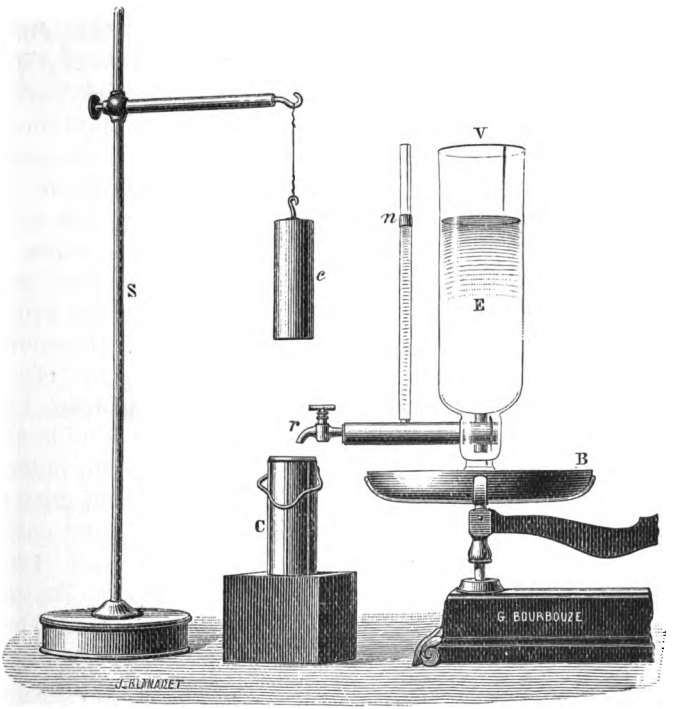


Fig. 39

contenue dans le vase V. On constate alors que l'équilibre est détruit et qu'il se rétablit quand on remplit d'eau le cylindre creux A, pourvu que le cylindre plein reste complètement immergé.

Ce dernier a donc perdu une portion de son poids égale au poids du volume d'eau dont il occupe la place, ou bien, ce qui est la même chose, la poussée du liquide contre le cylindre immergé est égale au poids du liquide qu'il déplace.

Digitized by Google

RÉCIPROQUE DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

Quand un corps plonge dans un liquide, il exerce sur ce liquide une pression de haut en bas égale au poids du liquide déplacé. D'où il résulte que le corps immergé fera monter le liquide dans le vase dans lequel on le plonge, de la même quantité que si on y ajoutait un volume de liquide égal au sien.

DÉMONSTRATION DU PRINCIPE

On démontre expérimentalement ce fait en plaçant sur l'un des plateaux d'une balance de Roberval une éprouvette à pied semblable à celle qui sert à démontrer le principe des corps flottants, et dans laquelle on verse de l'eau distillée en quantité suffisante pour que le cylindre plein puisse être complètement immergé. On lui fait équilibre avant l'immersion en plaçant une tare sur l'autre plateau. Le niveau du liquide est indiqué par un index mobile qui peut glisser sur le petit tube communiquant avec l'éprouvette. Dans ces conditions, si l'on vient à immerger complètement le cylindre dans l'eau au milieu de laquelle il est maintenu par un fil attaché au support indépendant de la balance, l'équilibre de la balance sera détruit et le niveau du liquide arrivera en n' en même temps que le fléau de la balance s'inclinera du côté de l'éprouvette (*fig. 40*).

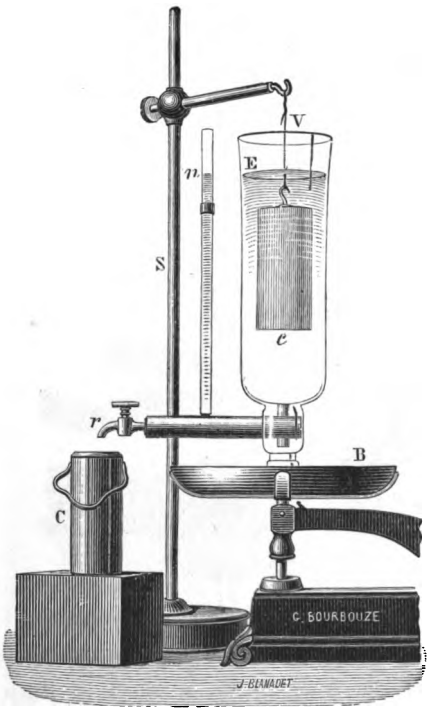


Fig. 40

Pour rétablir l'équilibre du fléau de la balance, il faut faire sortir par le robinet r une quantité de liquide capable de

Digitized by Google

remplir le cylindre creux dont la capacité est égale à celle du cylindre plein ; le niveau du liquide revient à son point primitif.

On peut déduire de ce principe une méthode pour déterminer la densité d'un corps solide ou liquide aussi exactement qu'avec la balance hydrostatique.

Mode opératoire

Placer sur l'un des plateaux d'une balance Roberval un vase en verre mince contenant de l'eau distillée ainsi que le corps dont on veut connaître la densité. Faire la tare. Enlever le corps et le remplacer par des poids marqués, de manière à rétablir l'équilibre.

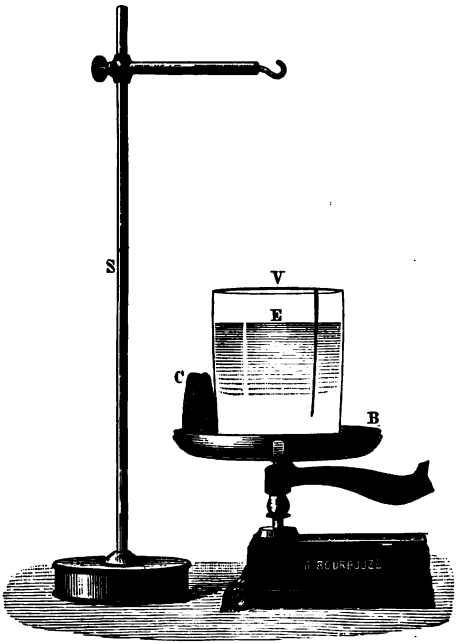


Fig. 41

Ces poids représenteront le poids P du corps dans l'air obtenu par la méthode des doubles pesées.

Plonger le corps dans l'eau ; l'y maintenir par un fil accroché au support indépendant de la balance. L'équilibre sera détruit.

Les poids qu'il faudra retirer pour le rétablir représenteront le poids p d'un égal volume d'eau.

Digitized by Google

Le rapport $\frac{P}{p}$ donnera la densité cherchée à la température ambiante.

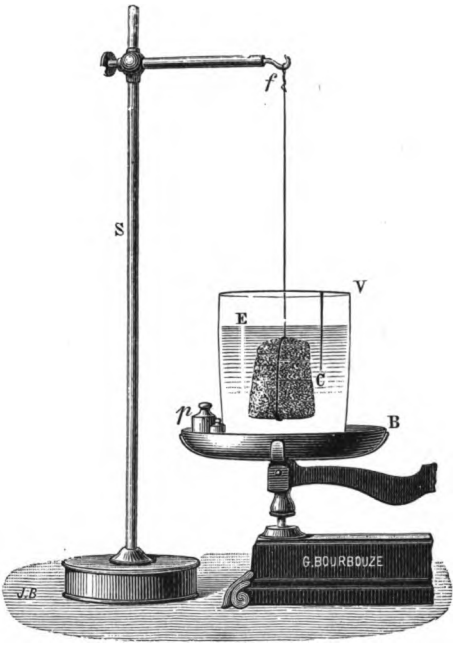


Fig. 42

Exemple. — Soient :

P poids du corps = 36 g,4 ; p poids d'un égal volume d'eau = 12g,7.

$$\frac{P}{p} = \frac{36,4}{12,7} = 2,85 \text{ densité cherchée.}$$

On peut remarquer que pour avoir p, il est plus commode de retrancher de P (le poids du corps) le poids P′ qui reste sur le plateau de la balance, lorsque l'équilibre est rétabli, on a ainsi :

$$P - P' = p \quad 36,4 - 23,7 = 12^g,7, \text{ d'où } p = 12^g,7.$$

Digitized by Google

DENSITÉ D'UN CORPS SOLIDE

MÉTHODE DE LA BALANCE HYDROSTATIQUE

Mode opératoire

Mettre le corps solide dont on veut déterminer la densité sur l'un des plateaux B de la balance hydrostatique. Etablir l'équilibre en plaçant sur l'autre plateau A de petites lames de plomb. — Enlever le corps, — rétablir le même équilibre avec des poids marqués. On obtiendra ainsi le poids P du corps dans l'air par la méthode des doubles pesées.

Suspendre le corps à l'extrémité d'un fil fin fixé au plateau B. Le faire plonger dans un vase contenant de l'eau distillée (*fig. 44*). Dans ces conditions l'équilibre est détruit. Les poids marqués nécessaires pour compenser la poussée représentent, d'après le principe d'Archimède, le poids P' d'un égal volume d'eau.

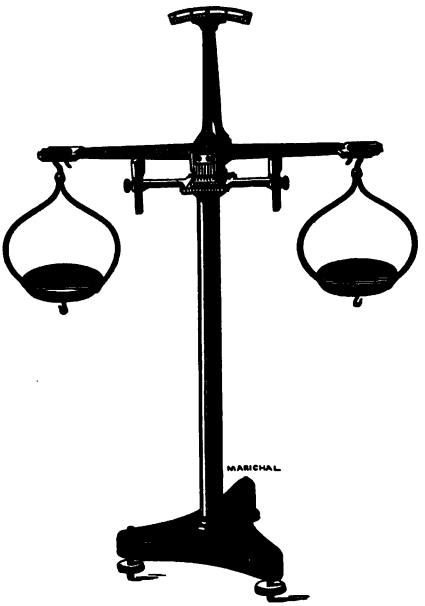


Fig. 43

En divisant le poids du corps dans l'air par le poids de l'eau déplacée, on aura la densité du corps soumis à l'expérience, à la température ambiante.

Si, par exemple, le poids du corps est 24ᵍ, 06 dans l'air, et que le poids d'un égal volume d'eau soit 3ᵍ, 30, on aura, d'après la formule simple $\frac{P}{p} = D$, la densité cherchée $\frac{24,06}{3,30} = 7,29$.

On peut, à l'aide de la disposition représentée dans la figure

Digitized by Google

ci-contre (*fig. 45*), prendre par la même méthode la densité d'un corps réduit en petits fragments. Pour faire cette manipulation, on suspend à l'extrémité d'un fil fixé au plateau B un

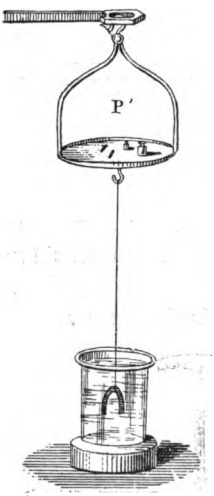


Fig. 44

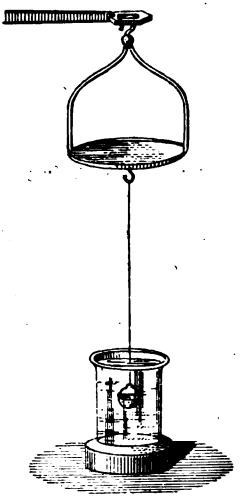


Fig. 45

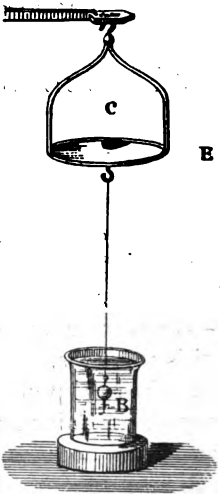


Fig. 46

petit panier en laiton que l'on fait plonger dans l'eau distillée. On place le corps sur le même plateau et l'on fait la tare.

On procède ensuite de la manière ordinaire.

Digitized by Google

DENSITÉ DES CORPS SOLIDES

Plus légers que l'eau

MÉTHODE DE LA BALANCE HYDROSTATIQUE

Mode opératoire

Placer le corps *c*, dont on veut connaître la densité, sur l'un des plateaux de la balance hydrostatique. — Suspendre par un fil, au crochet du même plateau une boule en métal munie d'une pointe (*fig. 46*). Après l'avoir plongée dans l'eau distillée, établir l'équilibre en plaçant sur l'autre plateau des lames de plomb. — Remplacer le corps *c* par des poids marqués. Dans ces conditions, on obtiendra, pour le même équilibre, le poids du corps *c* par la méthode des doubles pesées. — Le fixer à la pointe de la boule B qui le maintiendra immergé dans l'eau. Les poids qu'il faudra mettre à la place du corps pour rétablir l'équilibre feront connaître le poids *p* d'un même volume d'eau (*fig. 49*).

En divisant le poids P par *p*, on aura la densité du corps plus léger que l'eau à la température ambiante.

Exemple. — Soient P poids du corps dans l'air . . = 18g,80

— Soient *p* poids d'un égal volume d'eau = 19,36

La densité cherchée sera exprimée par le rapport $\frac{P}{P'}$.

$$\frac{18,80}{19,36} = 0,97 = \text{densité de la cire.}$$

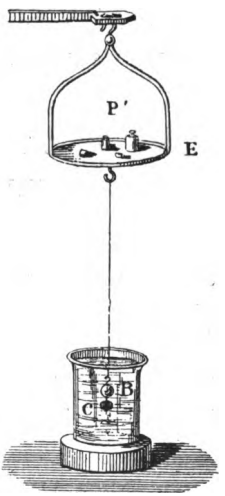


Fig. 47

DENSITÉ DES LIQUIDES

En prenant successivement la poussée qu'un même corps éprouve dans le liquide dont on a à déterminer la densité

Digitized by Google

et dans l'eau distillée on aura le poids du volume du liquide déplacé et celui d'un égal volume d'eau.

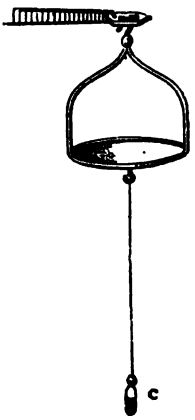


Fig. 48

Mode opératoire

Faire la tare du cylindre de verre *c* accroché au plateau de la balance hydrostatique; le faire plonger dans le liquide dont on veut déterminer la densité. Les poids marqués que l'on met sur le plateau représenteront le poids P d'un poids déterminé de ce liquide.

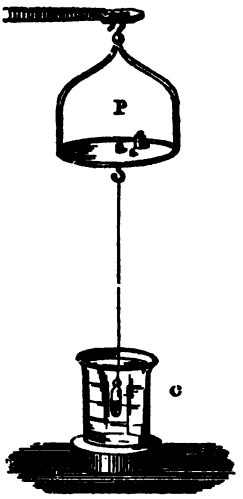


Fig. 49

Plonger le même cylindre après l'avoir essuyé dans l'eau distillée. Les poids qu'il faut mettre dans le plateau pour rétablir ce même équilibre feront connaître le poids P′ d'un égal volume d'eau.

En divisant P par P′ on aura la densité cherchée.

MÉTHODE DU FLACON — CORPS SOLIDES
DÉTERMINATION DES DENSITÉS A 0°

On peut à l'aide de cette méthode déterminer avec une grande précision la densité des corps réduits en fragments, ainsi que celle des corps en poudre. Mais pour que l'on puisse compter d'une manière certaine sur les résultats obtenus, il faut que le bouchon du flacon (*fig. 50*) soit parfaitement rodé à l'émeri, dans son col.

Ce flacon est en verre mince, et son bouchon est surmonté d'un tube capillaire terminé à sa partie supérieure par un petit entonnoir. Enfin, un trait d'affleurement est tracé en A sur le tube capillaire (*fig. 50*).

Mode opératoire

Remplir entièrement le flacon d'eau distillée. — Le fermer

Digitized by Google

avec soin. — Enlever l'excès du liquide avec un petit touret de papier buvard de façon à amener son niveau au trait d'affleurement A. Essuyer le flacon, le placer ensuite sur l'un des plateaux d'une balance à côté du corps réduit en fragments (*fig. 50*). Faire la tare avec des poids ordinaires ou de la grenaille de plomb.

Enlever le corps, le remplacer par des poids marqués en

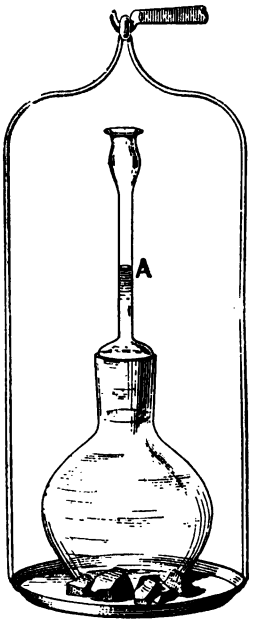


Fig. 50

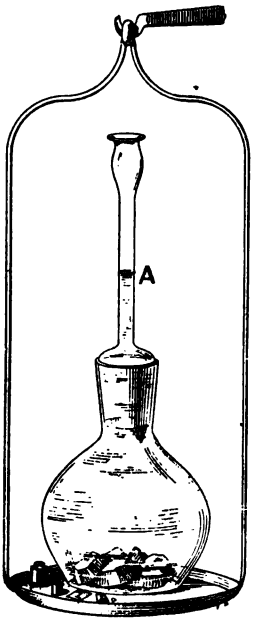


Fig. 51

quantité nécessaire pour rétablir le même équilibre. Ces poids représenteront le poids P du corps dans l'air par la méthode des doubles pesées.

Introduire le corps dans le flacon (*fig. 51*). On aura ainsi fait sortir un volume d'eau égal au sien. Enlever comme précédemment l'excès du liquide pour avoir le même affleurement en A à 0°. Essuyer le flacon à nouveau, le remettre en place; les poids marqués nécessaires pour rétablir l'équilibre primitif représenteront évidemment le poids P′ de l'eau déplacée.

On aura ainsi le poids d'un volume d'eau égal au volume

Digitized by Google

du corps. La densité cherchée sera donc exprimée par le rapport $\frac{P}{P'}$.

Exemple. — Soient P poids du corps dans l'air = 8g,256,
P′ poids de l'eau déplacée . = 3g,225,

on aura $\frac{P}{P'} = \frac{8,256}{3,225} = 2,56$ densité cherchée à la température ambiante.

MÉTHODE DU FLACON. — CORPS LIQUIDES

La détermination de la densité des liquides par cette méthode consiste à prendre successivement le poids d'un volume bien déterminé du liquide dont on veut connaître la densité et le poids d'un égal volume d'eau à la même température.

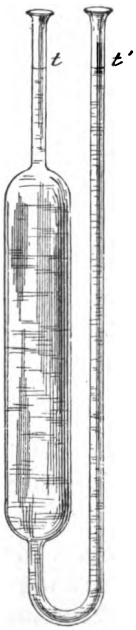


Fig. 52

On arrive à faire exactement ces déterminations soit avec un flacon semblable à celui qui sert aux solides (*fig. 53 et 54*), soit avec celui représenté ci-contre, qui n'est que l'appareil de Hoberg, modifié par Pouillet (*fig. 52*).

Mode opératoire

Remplir le flacon F du liquide dont on veut connaître la densité. — Le fermer avec son bouchon à tube capillaire. — Le plonger dans la glace fondante. Enlever l'excès du liquide avec un petit touret de papier buvard de façon à amener son niveau au trait d'affleurement en A. Le retirer de la glace fondante après s'être assuré que le niveau du liquide est resté stationnaire en A.

On aura ainsi un volume de ce liquide bien déterminé à la température zéro.

Essuyer le flacon avec soin, le placer ensuite sur l'un des plateaux de la balance. — Faire la tare. Vider le flacon. — Le dessécher en faisant passer un courant d'air au moyen de la soufflerie. — Le replacer sur le plateau de la balance. — Les poids P qu'il faudra mettre pour rétablir l'équilibre représen-

Digitized by Google

teront le poids d'un volume bien déterminé de ce liquide.

Fig. 53

Faire la même opération avec l'eau distillée; les poids P′, nécessaires pour rétablir à nouveau l'équilibre, représenteront évidemment le poids d'un égal volume d'eau.

La densité cherchée sera exprimée par le rapport $\frac{P}{P'}$.

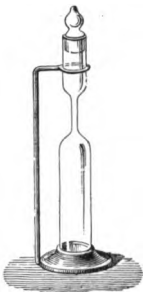


Fig. 54

Flacon de Regnault pour liquides avec son support.

Exemple :

Soient : P le poids du liquide à la température zéro . . . . . = 23g,46,

P′ le poids d'un égal volume d'eau à la même température. . . . . = 27g,60,

on aura $\frac{P}{P'} = \frac{23,46}{27,60} = 0,85$ densité cherchée.

Remarques sur le remplissage des flacons

1° *Corps solides.* — Pour remplir les flacons d'eau distillée, on plonge la partie A B (*fig. 55*) dans un vase contenant l'eau, de façon que cette partie soit complètement pleine de liquide et que celui-ci déborde même un peu. On enfonce alors le bouchon (sous l'eau), le liquide monte dans le tube capillaire et arrive dans l'entonnoir *c*. On place le flacon dans la glace fondante, et lorsque l'eau a bien pris sa position d'équilibre, on enlève avec du papier buvard l'excès d'eau dépassant le trait *a*.

Fig. 55

2° *Corps liquides.* — Si l'on dispose d'une assez grande quantité de liquide, on peut employer le même mode de remplissage, en employant alors un flacon de même forme que le précédent. Si on n'a qu'une très petite quantité de liquide ou qu'on emploie le flacon de Regnault (*fig. 54*), on verse le liquide dans l'entonnoir. Pour le faire pénétrer dans le flacon, on se sert d'un tube capillaire que l'on fait arriver jusqu'au fond du flacon et par lequel

Digitized by Google

on aspire l'air qui remplit ce flacon. La pression atmosphérique fait alors descendre le liquide (*fig. 55*).

Pour vider le flacon, on pourra se servir du même tube capillaire, en soufflant cette fois de façon à expulser le liquide.

MÉTHODE DU FLACON

Corps en poudre ou en fragments

Pour déterminer avec précision, la densité d'un corps en poudre ou en petits fragments, il faut avoir soin de placer le flacon contenant l'eau et le corps, sous le récipient de la machine pneumatique (*fig. 56*) de manière à faciliter, par le vide, le dégagement de l'air qui se trouve entre les trapicules du corps.

On arrive au même résultat en faisant bouillir le liquide pourvu que la poudre qu'il contient ne puisse être altérée par cette ébullition. Il faut de plus que ce corps soit à la température de zéro. On satisfait à cette condition en plongeant le flacon dans la glace fondante de manière à amener le niveau du liquide en A avec un petit touret de papier buvard. On opère ensuite de la même manière lorsque le corps est introduit dans le flacon. On peut donc ainsi obtenir le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps à la température de la glace fondante.

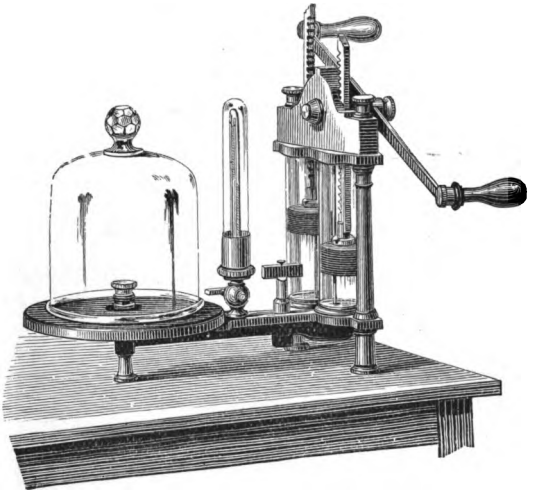


Fig. 56

MESURE DES DENSITÉS

Corps poreux

Pour déterminer la densité réelle ou la densité apparente d'un

Digitized by Google

corps poreux, soit par exemple d'un morceau de craie, on peut procéder par l'une ou l'autre des méthodes que nous avons indiquées.

DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ RÉELLE D'UN CORPS POREUX

Pour avoir la densité réelle d'un corps poreux, on prend le poids du corps dans l'air par la méthode des doubles pesées, puis on détermine, après l'avoir imbibé d'eau, le poids de l'eau déplacée.

Soient : P le poids du corps dans l'air,
P′ le poids de l'eau déplacée,
$\frac{P}{P'}$ sera la densité cherchée.

Si, par exemple, P = 10g,710 et P′ poids de l'eau déplacée après l'imbibition = 4g,32, on aura la densité cherchée en divisant 10,710 par 4,32.

$\frac{10,710}{4,32} = 2,479$ (densité réelle de la craie à la température ambiante).

DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ APPARENTE D'UN CORPS POREUX

Cette détermination consiste à chercher quelle serait la densité d'un corps qui aurait le même volume extérieur et le même poids que le morceau de craie dont on a préalablement déterminé la densité réelle.

On obtient ce volume en pesant le corps après l'imbibition, l'accroissement de poids p, ajouté au poids de l'eau déplacée P′, représentera le poids d'un égal volume d'eau.

Soient :
P le poids du corps dans l'air. . . . . = 10g,710
P′ le poids de l'eau déplacée après l'imbibition . . = 4g,320
P l'accroissement de poids » . . = 2g,569
P′ + p seront le poids de l'eau déplacé par le corps comme s'il était enduit d'une couche de vernis, ce poids P′ + p. . = 6g,889
La densité apparente sera exprimée par le rapport :

$$\frac{P}{P'+p} = \frac{10,710}{4,320+2,569} = \frac{10,710}{6,889} = 1,5691.$$

Digitized by Google

MESURE DES DENSITÉS

Corps solubles dans l'eau

Quand le corps dont on a à déterminer la densité est soluble dans l'eau, on opère avec un autre liquide dans lequel le corps est insoluble, soit, par exemple, avec de l'alcool, soit avec de l'essence de térébenthine, puis l'on prend, par l'une des méthodes que nous avons indiquées, la densité des corps par rapport au liquide choisi et celle de ce liquide par rapport à l'eau à son maximum de densité (4°).

Enfin, il suffit de faire le produit des deux densités trouvées pour avoir la densité du corps à zéro par rapport à l'eau.

Exemple. — Soient :

P le poids du corps (du sucre, par exemple) . . . . = 3g,197
P″ le poids d'un égal volume du liquide (alcool). . . = 1g,587

$\frac{P''}{P'} = \Delta$ densité du liquide par rapport à l'eau = 0,7943.

On aura $\frac{P}{P''} = \frac{3,197}{1,587} = 2,0144$, densité rapportée à celle du liquide.

Il reste, d'après ce qui précède, à multiplier 2,0144 par 0,7943, et leur produit 1,600 exprimera la densité du corps par rapport à l'eau.

On voit que multiplier la densité trouvée par rapport à l'alcool par la densité de l'alcool, c'est multiplier la valeur par $\frac{P''}{P'}$, ce qui donne $\frac{P}{P''} \times \frac{P''}{P'} = \frac{P}{P'}$, densité du corps à la température ambiante.

En remplaçant les lettres par leur valeur, on a :

$\frac{P}{P''} = \frac{3,197}{1,587} = 2,0144$ (densité du corps par rapport à l'alcool).

$\frac{P''}{P'} = \frac{16,148}{20,322} = 0,7943 = \Delta$ (densité de l'alcool).

$\frac{3,197}{1,587} \times \frac{16,148}{20,328} = \frac{P}{P'} = \frac{51,625}{32,260} = 1,600$

(densité du sucre par rapport à l'eau distillée).

Digitized by Google

CORRECTIONS A FAIRE SUBIR AUX RÉSULTATS TROUVÉS POUR LA DENSITÉ

Dans toutes les manipulations sur les densités, nous avons fait abstraction de la poussée de l'air et des variations de température.

Corrections relatives à la poussée

En vertu du principe d'Archimède, qui s'applique aussi bien aux gaz qu'aux liquides, les corps que l'on place dans les plateaux de la balance, aussi bien que les poids marqués, éprouvent de la part de l'air une poussée qui n'est pas égale de part et d'autre, si les volumes ne sont pas les mêmes. Appelons P les poids marqués qui font équilibre au corps dans l'air, V le volume du corps, d_1 la densité du métal qui constitue les poids marqués. Ceux-ci éprouvent une poussée égale à $\frac{P}{d_1}$ 0g,001293, 0g,001293 étant le poids du centimètre cube d'air, P étant exprimé en grammes.

Donc le poids véritable qui fait équilibre au corps est :

$$P\left(1 - \frac{0{,}001293}{d_1}\right).$$

Soit x le poids cherché. Dans l'air le corps éprouve une poussée égale à $V \times 0{,}001293$, V étant exprimé en centimètres cubes, on a donc :

$$x - V \times 0{,}001293 = P\left(1 - \frac{0{,}001293}{d_1}\right),$$

d'où x, si on connaît V.

Digitized by Google

Or, si on appelle D la densité vraie, on a :

$$x = VD, \quad \text{d'où } \frac{x}{D} = V$$

$$x\left(1 - \frac{0{,}0012933}{D}\right) = P\left(1 - \frac{0{,}0012933}{d_1}\right).$$

On a ainsi le poids x corrigé de la poussée de l'air, en supposant celui-ci à la température de 0° et à la pression de 760 et complètement sec.

Si la température est $t°$, la pression H et l'état hygrométrique e (voir hygrométrie), on remplacera 0,001293 par :

$$0{,}001293\,\frac{1}{1+\alpha t} \times \frac{\left(H - \frac{3}{8}\,e\,F\right)}{760},$$

α étant le coefficient de dilatation de l'air, F la pression maxima de la vapeur d'eau à la température de l'expérience. D'une façon générale représentons, pour simplifier l'écriture, par a le poids du centimètre cube d'eau dans les conditions de l'expérience. On a :

$$x = \frac{P\left(1 - \frac{a}{d_1}\right)}{1 - \frac{a}{D}},$$

ou encore en remplacant x par VD,

$$VD = \frac{P\left(1 - \frac{a}{d_1}\right)}{1 - \frac{a}{D}},$$

$$\text{ou} \quad VD = \frac{P\left(1 - \frac{a}{d_1}\right)}{D - a} \times D,$$

$$\text{ou} \quad V = \frac{P\left(1 - \frac{a}{d_1}\right)}{D - a}.$$

Digitized by Google

De même pour un égal volume d'eau, on aura :

$$V = \frac{P'\left(1 - \frac{a'}{d_1}\right)}{D' - a'},$$

a' pouvant être différent de a, si les conditions extérieures ont changé. En divisant membre à membre, on a :

$$\frac{D - a}{D' - a'} = \frac{1 - \frac{a}{d_1}}{1 - \frac{a'}{d_1}} \times \frac{P}{P'}.$$

Remarque. — La correction sur chaque pesée étant de l'ordre du millième, il serait évidemment illusoire de le faire dans toute manipulation qui ne comporterait pas ce degré de précision, telle que la méthode des aréomètres à volume constant que nous exposerons plus loin.

Correction de température

Nous avons, dans les manipulations précédentes, supposé le corps à 0°. En général, il n'en est pas ainsi. Nous avons donc, en définitive, trouvé la densité du corps à t°.

Pour la ramener à 0°, il faut multiplier la densité trouvée par le facteur $1 + K\,t$, K étant le coefficient de dilatation cubique du corps (voir dilatations) t la température au moment de l'expérience.

Il faut d'abord faire la correction relative à l'eau en multipliant la densité trouvée qui a été prise par rapport à l'eau à la température ambiante, par la densité de cette eau par rapport à l'eau distillée à 4°.

Le tableau suivant donne la densité de l'eau depuis — 10° jusqu'à 100°.

Digitized by Google

TABLEAU DE LA DENSITÉ ET DU VOLUME DE L'EAU

TEMPÉRATURE	DENSITÉ	VOLUME	TEMPÉRATURE	DENSITÉ	VOLUME
— 10°	0,998145	1,001858	26°	1,996866	1,003144
— 9	0,998427	1,001575	27	0,996603	1,003408
— 8	0,998685	1,001317	28	0,996331	1,003682
— 7	0,998911	1,001089	29	0,996051	1,003965
— 6	0,999118	1,000883	30	0,965765	1,004253
— 5	0,999298	1,000702	31	0,99547	1,00455
— 4	0,999455	1,000545	32	0,99517	1,00486
— 3	0,999590	1,000410	33	0,99485	1,00518
— 2	0,999703	1,000297	34	0,99452	1,00551
— 1	0,999797	1,000203	35	0,99418	1,00586
0	0,999871	1,000129	36	0,99383	1,00621
+ 1	0,999928	1,000072	37	0,99347	1,00657
2	0,999990	1,000031	38	0,99310	1,00694
3	0,999991	1,000009	39	0,99273	1,00732
4	1,000000	1,000000	40	0,99235	1,00770
5	0,999990	1,000010	41	0,99197	1,00809
6	0,990970	1,000030	42	0,99158	1,00849
7	0,999933	1,000067	43	0,99118	1,00889
8	0,999886	1,000114	44	0,99078	1,00929
9	0,999824	1,000176	45	0,99037	1,00971
10	0,999747	1,000253	46	0,98996	1,01014
11	0,999655	1,000345	47	0,98954	1,01057
12	0,999549	1,000451	48	0,98910	1,01101
13	0,999430	1,000570	49	0,98865	1,01148
14	0,999299	1,000701	50	0,98820	1,01195
15	0,999160	1,000841			
16	0,999002	1,000999	55	0,98582	1,01439
17	0,998841	1,001160	60	0,98328	1,01691
18	0,998654	1,001348	65	0,98074	1,01964
19	0,998460	1,001542	70	0,97794	1,02256
20	0.998259	1,001744	75	0,97498	1,02566
21	0,998047	1,001957	80	0,97194	1,02887
22	0,997826	1,002177	85	0,96879	1,03221
23	0,997601	1,002405	90	0,96556	1,03567
24	0,997367	1,002641	95	0,96219	1,03931
25	0,997120	1,002888	100	0,95865	1,04312

Digitized by Google

MÉTHODE DE LA BALANCE DE MOHR (*fig. 57*)

Description. — Cette balance se compose :

1° D'un fléau à bras inégaux qui peut tourner autour d'un axe situé en S. Sur la partie droite du fléau on a ménagé dans le métal de petites entailles qui recevront des cavaliers P′ P″ P‴ P⁗.

2° A l'extrémité F du fléau, on suspend par un fil de platine un flotteur en verre T à l'intérieur duquel est soudé un thermomètre.

3° A l'extrémité F′ un poids P servant de tare au flotteur.

Les cavaliers P′ P″ P‴ P⁗ représentent respectivement :

P′ Le poids de l'eau distillée à 15° déplacée par le flotteur.

P″ le 1/10 de P′.

P‴ le 1/100 de P′.

P⁗ Le 1/1000 de P′.

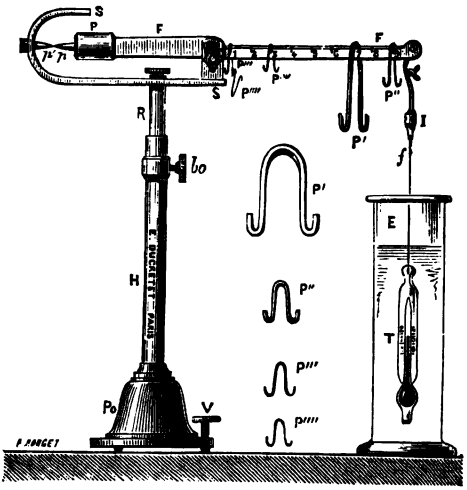


Fig. 57

Quand la balance est bien réglée, l'équilibre existe, dans le cas de la figure, en supposant le cavalier P suspendu à l'extrémité L et le flotteur plongé dans l'eau distillée à la température de 15°.

Densité d'un liquide plus léger que l'eau. — On verse ce liquide dans l'éprouvette E ; on y plonge entièrement le flotteur. L'équilibre étant détruit, on le rétablit en plaçant le cavalier P′ dans une des entailles. Supposons, pour fixer les idées, que si on place le cavalier P′ à l'entaille marquée 5, la balance incline à gauche tandis qu'elle incline à droite lorsque le cavalier P′ est à l'entaille 6. On le laisse à l'entaille 5 et on opère de même par tâtonnements avec les autres cavaliers. Supposons que

P″ se place à la division 8,

P‴ » 7,

P⁗ » 2,

La densité cherchée est 0,5872.

Digitized by Google

Dans le cas des liquides plus lourds que l'eau, le mode opératoire est le même, en ayant soin d'accrocher le cavalier P′ au crochet I, ce qui donne l'unité. Pour les décimales, on opère comme précédemment.

DENSITÉS DES LIQUIDES

Méthode des Pipettes

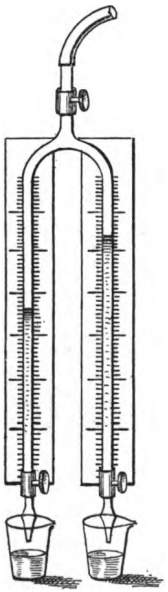


Fig. 58

On peut déterminer le rapport des densités de deux liquides à l'aide des hauteurs de ces liquides qui restent suspendues dans deux pipettes pour un même vide partiel établi au-dessus des niveaux des liquides dans ces pipettes (*fig. 58*).

1° La pression atmosphérique étant établie à la partie supérieure des pipettes, déterminer les hauteurs h_1 et h_2 des petites colonnes liquides qui restent suspendues au bas des tubes par capillarité.

2° Faire immerger la pointe des pipettes de quelques centimètres dans les liqueurs.

3° Produire un vide partiel et par suite une aspiration dans les deux pipettes.

4° Déterminer les hauteurs H_1 et H_2 des liquides soulevés. On a :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{H_1 - h_1}{H_2 - h_2}.$$

$\frac{p_2}{p_1}$ est le rapport des poids spécifiques et aussi le rapport des densités.

DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ D'UN SOLIDE

Méthode de l'aréomètre à volume constant

L'aréomètre, ou balance de Nicholson (*fig. 59*), se compose

Digitized by Google

d'un cylindre métallique V terminé par deux cônes. A celui de la partie supérieure est fixée une tige qui supporte une petite capsule C; sur cette tige peut glisser à frottement un petit index *a*, qui sert à déterminer le point d'affleurement. Une cuvette conique, maintenue par un crochet qui termine le cône de la partie inférieure, contient une certaine quantité de plomb. Dans ces conditions, le centre de gravité se trouvant plus bas que le centre de poussée, c'est-à-dire que le centre de gravité de l'eau déplacée, l'instrument se tiendra dans la verticale. Une lame LL′, placée sur l'éprouvette contenant de l'eau distillée, sert non seulement à prendre le point d'affleurement, mais encore à éviter l'immersion de l'instrument dans l'eau, quand on place sur la capsule C des poids trop forts.

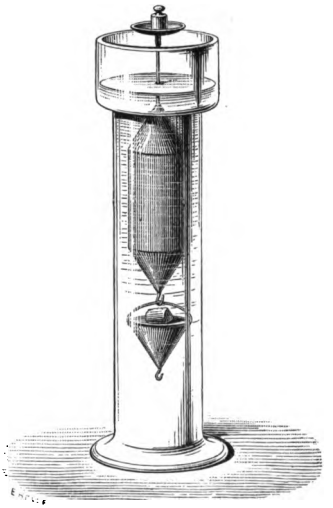


Fig. 59

Mode opératoire

Placer le corps solide M sur la capsule C (*fig. 60*), mettre

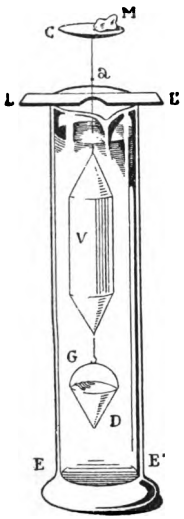


Fig. 60

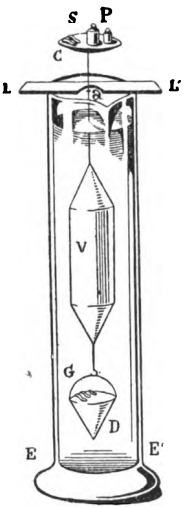


Fig. 61

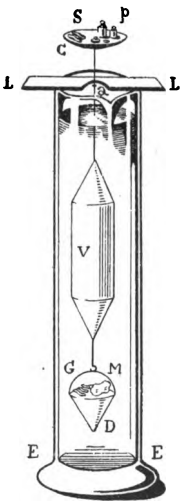


Fig. 62

dans la cuvette conique D des lames de plomb G en quantité

Digitized by Google

suffisante pour amener le trait d'affleurement à quelques millimètres au-dessous de la lame LL'. Obtenir un premier affleurement à l'aide d'autres lames de même métal S placées à côté du corps M. Remplacer le corps M par des poids marqués P (*fig. 61*). Ces poids représenteront, pour le même affleurement, le poids P du corps dans l'air. Retirer ces poids marqués de la capsule C et mettre le corps M dans la cuvette conique D. Le poids p (*fig. 62*), d'un égal volume d'eau, est obtenu en compensant l'action de la poussée sur le corps M par les poids marqués, nécessaires pour amener l'index au point d'affleurement dans le plan de la lame LL'. En divisant P par p, on aura la densité cherchée.

Détermination de la densité d'un solide. Exemple numérique :

Poids du corps dans l'air : P = 11g,72.
Poussée exercée par l'eau : p = 5g,27,
Densité du corps $\frac{P}{p} = \frac{11,72}{5,27} = 2,22$.

DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ D'UN LIQUIDE

Méthode de l'aréomètre à volume constant

L'aréomètre de Fahrenheit repose sur le même principe que celui de Nicholson. Il en diffère en ce qu'il est entièrement en verre et d'une seule pièce (*fig. 63*).

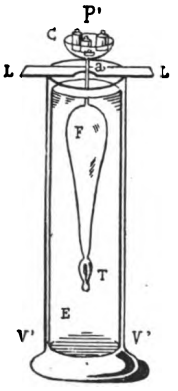


Fig. 63

Mode opératoire

Placer l'aréomètre dont on a au préalable déterminé le poids P dans une éprouvette contenant de l'eau distillée. Ajouter des poids marqués p jusqu'à ce que l'affleurement ait lieu à un trait a. Le poids d'eau déplacée est $P + p$.

Retirer l'appareil de l'eau, l'essuyer avec soin et le plonger dans le liquide étudié. Ajouter des poids marqués p' jusqu'à amener l'affleurement en a. $P + p'$ est le poids du liquide déplacé.

$P + p$ et $P + p'$ sont donc le poids de volumes égaux d'eau et de liquide.

La densité cherchée est donc $D = \frac{P + p'}{P + p}$.

Digitized by Google

Exemple numérique :

Poids de l'instrument. . . . . P = 43g,32
Poids ajouté dans l'eau. . . . p = 12g,12
Poids ajouté dans le liquide . p' = 2g,14

Densité du liquide :

$$D = \frac{39^g,32 + 2^g,14}{43,32 + 11,12} = \frac{4546}{5444} = 0,835.$$

Méthode de l'aréomètre à poids constant et à volume variable (Densimètre Brisson)

Cette méthode est une application des trois principes suivants :

1° Toutes les fois qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, son poids est égal à celui du liquide que déplace la portion de ce corps plongée dans le liquide;

2° La quantité dont il s'enfonce est toujours proportionnelle au poids dont il est chargé;

3° Les densités sont inversement proportionnelles aux volumes.

L'aréomètre devant servir à déterminer la densité des liquides plus légers que l'eau devra être construit de manière à ce que le point d'affleurement soit, dans l'eau distillée, au bas du tube et que le zéro de l'échelle coïncide avec ce point.

Les divisions représentant les volumes sont obtenues en chargeant successivement l'instrument avec des poids de 1, 2, 3, 4 et 5 grammes. Chacune de ces divisions, étant divisée en dix parties, donne pour unité de volume $\frac{1}{20}$ de centimètre cube. Ces déterminations faites, on rend à l'instrument son poids primitif.

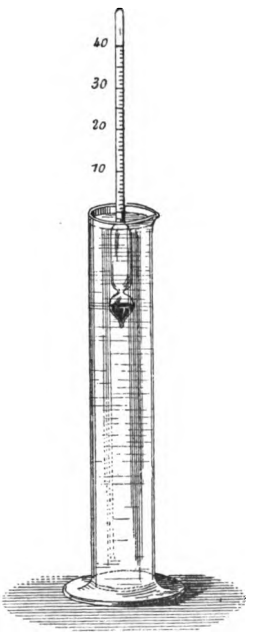


Fig. 64

Mode opératoire

Prendre le poids de l'instrument par la méthode des doubles pesées, le plonger ensuite dans le liquide dont on veut déterminer la densité. Noter la division correspondant à cet

Digitized by Google

affleurement. On aura ainsi le volume de ce liquide mesuré sur l'échelle dont les divisions ont été préalablement faites avec des poids marqués. Le volume sera au volume de l'eau, mesuré par l'aréomètre de même poids, comme $P + p$ est à P.

Les densités étant en raison inverse des volumes, la densité cherchée sera à celle de l'eau comme P à $P + p$.

$$\text{On aura donc } \frac{D}{1} = \frac{P}{P+p}.$$

$$\text{d'où } D = \frac{P}{P+p}.$$

Exemple. — Si l'on plonge l'instrument, dont le poids demeure constant, dans un liquide dont on veut connaître la densité, et qu'il s'y enfonce de la même quantité qu'il s'était enfoncé dans l'eau lorsqu'il pesait 18g,69, on aura le volume de ce liquide mesuré sur l'échelle dont les divisions ont été préalablement faites avec des poids marqués. Ce volume sera au volume de l'eau, mesuré par l'échelle de l'aréomètre, à poids constant comme 18g,69 est à 15g,25, poids de l'instrument.

En appliquant la formule ci-dessus, on aura :

$$\frac{D}{1} = \frac{15,25}{18,69},$$

$$\text{d'où } D = \frac{15,25}{18,69} = 0,815.$$

Liquides plus denses que l'eau

Le densimètre Brisson, destiné à la mesure des densités des liquides plus denses que l'eau, ne diffère de celui que nous venons de décrire que par la manière dont il est lesté.

Dans ce dernier, le point d'affleurement, dans l'eau distillée, doit être à la partie supérieure du tube et le zéro de l'échelle doit coïncider avec ce point.

Nous indiquerons ensuite la construction et la graduation des aréomètres Baumé et leur emploi comme densimètres. L'aréomètre Baumé a la même forme que l'aréomètre Brisson. Il comporte deux modes de graduation, suivant qu'il doive servir aux liquides plus denses ou aux liquides moins denses que l'eau.

I. *Aréomètres pour les liquides plus denses que l'eau.* — On leste le tube aréométrique de façon qu'il affleure à la partie supé-

Digitized by Google

rieure de la tige dans l'eau distillée à la température de 12°,5. On marque zéro au point d'affleurement ; on fait ensuite une dissolution de quinze parties de sel marin et de quatre-vingt-cinq d'eau (cette dissolution doit avoir, à 12°,5, une densité égale à 1,116). On marque 14 au point d'affleurement de l'aréomètre dans le liquide ainsi obtenu. On partage l'intervalle o — 15 en quinze parties égales et on prolonge les divisions au-dessous du trait 15.

Un tel appareil marque 66° dans l'acide sulfurique concentré et 43° dans l'acide azotique quadrihydraté.

II. *Aréomètres pour les liquides moins denses que l'eau.* — On forme une dissolution de dix parties de sel marin dans quatre-vingt-dix parties d'eau et on leste l'appareil de manière que l'affleurement ait lieu à la partie inférieure du tube. On marque zéro au point d'affleurement ; on plonge ensuite dans l'eau distillée à 12°, 5. On marque 10 au point d'affleurement ; on partage en dix parties égales et on continue la division au-delà du point 10. Un pareil aréomètre marque 47°,5 dans l'alcool absolu. Cette graduation a le grand inconvénient d'être arbitraire.

Pour se servir des aréomètres Baumé pour la détermination des densités on peut faire usage de tables disposées à cet effet ou bien appliquer les formules suivantes.

Pour les liquides plus denses que l'eau, d étant la densité, n le degré marqué par l'aréomètre, on a :

$$d = \frac{144}{144 - n}.$$

Pour les liquides moins denses :

$$d = \frac{128}{128 + n}.$$

Remarque. — Il est très facile, par un raisonnement simple, de retrouver ces formules.

Appelons V le volume de l'appareil jusqu'au zéro, v le volume d'une division ; d_e la densité de l'eau à 12°,5 ; $d_{s_{15}}$ la densité de l'eau salée à 15 °/₀ ; P le poids de l'appareil.

On a, en appliquant ce principe des corps flottants :

Dans l'eau pure :

$$V \times d_e = P;$$

dans l'eau salée :

$$(V + 15v)\, d_{s_{15}} = P;$$

dans le liquide de densité x :

$$(V + nv)\, x = P.$$

Digitized by Google

En éliminant V, v et P entre ces trois égalités, on trouve sensiblement :

$$x = \frac{144}{144 - n}.$$

Note. — $d_c = 0{,}99947$.
$d_s = 1{,}116$.

Graduation volumétrique et densimétrique des aréomètres

On rencontre dans la pratique des aréomètres portant une double division, l'une est la graduation volumétrique indiquant le volume du liquide dont le poids est égal au poids de l'aréomètre, l'autre indiquant immédiatement la densité du liquide étudié. Nous ne nous attarderons pas à faire l'étude de ces graduations dont le principe est identique à celui des appareils que nous venons de passer en revue.

ARÉOMÈTRE DE M. VANDEVYVER

Les divers aréomètres ou densimètres que nous venons de passer en revue exigent une assez grande quantité de liquide. Ils ne sont d'ailleurs pas applicables facilement aux liquides visqueux. De plus, la tension superficielle, variant avec les liquides, les indications de l'instrument sont variables d'un liquide à l'autre.

Fig. 65

Nous empruntons au *Journal de Physique* (3e série, t. IV), la description d'un nouvel aréomètre, construit en vue de la détermination des densités des moûts de bières, densités qui ne varient qu'entre 1.00 et 1.06. Cet instrument paraît éliminer les causes d'erreur ainsi que les inconvénients signalés plus haut.

L'instrument est en verre et se compose d'une carène divisée en deux parties, A et B, par une cloison horizontale étanche C. La partie B forme un réservoir fermé en D par un bouchon rodé à l'émeri. La carène est surmontée d'une tige qui porte une échelle pouvant être graduée de différentes manières; nous supposons cette échelle établie pour les liquides plus denses que l'eau et

Digitized by Google

nous admettrons qu'elle marque les densités comprises entre 1.00 (pour l'eau) et 1,6 par exemple (*fig. 65*).

Mode opératoire

On retourne l'instrument; on remplit, à refus, la partie B d'eau distillée, à *une température quelconque t;* on replace le bouchon sans introduire aucune bulle d'air; cela étant, on redresse l'appareil et on le plonge dans une éprouvette à pied contenant de l'eau distillée *à la même température t.*

Le point d'affleurement doit correspondre au point 1.00 de la graduation de la tige.

On opère de même pour un liquide quelconque, mais *l'immersion se fait toujours dans l'eau distillée.* Si le liquide est plus dense que l'eau, ce que nous supposons, l'appareil s'enfonce plus que tout à l'heure. Le point d'affleurement indique la densité.

L'échelle a été graduée empiriquement.

DENSITÉS DES LIQUIDES

celle de l'eau à 4° étant prise pour unité

Mercure (à 0°)		13,600
Brome		2,966
Acide sulfurique hydraté	SO^4H^2	1,849
Acide azotique fumant	AzO^3H	1,520
Acide hypo-azotique	AzO^2	1,451
Acide chlorhydrique hydraté	$ClH, 3H^2O$	1,208
Sulfure de carbone	CS^2	1,281
Benzine	C^6H^6	0,890
Essence de térébenthine	$C^{10}H^{16}$	0,864
Essence de citron	$C^{10}H^{16}$	0,847
Essence d'amandes amères	C^7H^6O	1,050
Alcool absolu	C^2H^6O	0,795
Alcool à 36°		0,958
Alcool à 70°		0,835
Ether	$C^4H^{10}O$	0,730
Ether formique	$C^3H^6O^2$	0,915

Digitized by Google

Ether autique	$C^4 H^8 O^2$	0,890
Ether oxalique	$C^6 H^{10} O$	1,093
Esprit de bois (alcool méthylique)	$C^1 H^4 O^1$	0,801
Liqueur des Hollandais	$C^2 H^4 Cl^2$	1,280
Acide formique	$C H^2 O^2$	1,220
Acide acétique	$C^2 H^4 O^2$	1,063
Eau de mer (en moyenne)		1,026
Lait		1,03
Vin		0,99
Huile d'olive		0,915

Pierres employées dans la joaillerie

Agate	2,53 à 2,62
Aigue-marine (Béryl)	2,67 à 2,71
Ambre (succin)	1,06 à 1,11
Améthiste orientale (corindon)	4,00
Améthiste (quartz violet)	2,65
Aventurine (quartz)	2,65
Béryl	2,67 à 2,71
Cornaline	2,58 à 2,60
Cristal de roche (quartz)	2,65
Diamant	3,52 à 3,53
Emeraude	2,69 à 2,74
Grenat (spessartine)	4,16 à 4,20
Grenat vert, de la Sibérie	3,84
Héliotrope (jaspe agate)	2,54 à 2,62
Hyacinthe (zircon)	4,60 à 4,67
Jade (néphrite)	2,96 à 3,06
Jaspe	2,52 à 2,76
Jayet ou jais (lignite)	1,30 à 1,32
Malachite	3,92 à 4,00
Marcassite	5,00 à 5,02
Obsidienne	2,36
Opale du Mexique	2,07 à 2,09
Pierre de Lune (orthose)	2,59
Rubis du Brésil (topaze rose)	3,51 à 3,53
Rubis de Sibérie (tourmaline)	3,04 à 3,06
Spath satiné (calcaire)	2,73
Topaze du Brésil	3,51 à 3,55
Topaze d'Espagne (quartz)	2,65
Tourmaline	3,03 à 3,13
Turquoise orientale	2,22 à 2,82
Vermeille (grenat Pyrope)	3,66 à 3,71
Zircon	4,04 à 4,57

Digitized by Google

DENSITÉ DES SOLIDES A 0°

celle de l'eau à 4° étant prise pour unité Corps simples

Aluminium	Al fondu. . .	2,56	Manganèse	Mn	8,01
»	laminé. . .	2,67	Mercure	Hg, solide à —40°	14,39
Antimoine	Sb.	6,72	Molybdène	Mo	8,60
Argent	Ag fondu. . .	10,512	Nickel	Ni fondu . .	8,28
Arsenic	As.	5,67	»	forgé. . .	8,67
Baryum	Ba.	»	Niobium	Nb	»
Bismuth	Bi	9,82	Or	Au fondu . .	19,26
Bore	B cristallin. .	2,69	»	laminé. .	19,36
Cadmium	Cd fondu. . .	8,60	Osmium	Os.	22,47
»	laminé . .	8,69	Palladium	Pd.	12,05
Calcium	Ca.	1,58	Phosphore	P	1,77
Carbone	C anthracite. .	1,34 à 1,46	Platine	Pt fondu. . .	21,45
»	diamant . .	3,50 à 3,53	Plomb	Pb.	11,35
»	graphite . .	2,09 à 2,24	Potassium	K	0,86
Cérium	Ce.	5,50	Rhodium	Rh.	12,41
Chrome	Cr.	5,90	Rubidium	Rb.	1,52
Cobalt	Co fondu. . .	7,81	Rhuthénium	Ru.	11,3
Cœsium	Cs	»	Sélénium	Se	4,30
Cuivre	Cu fondu. . .	8,85	Silicium	Si cristallin . .	2,65
»	laminé . .	8,95	»	amorphe. .	2,49
Didyme	Di	»	Sodium	Na	0,97
Erbium	E.	»	Souffre	S octaédrique .	2,07
Etain	Sn.	7,29	»	prismatique.	1,96 à 1,99
Fer	Fe fondu . . .	7,20	Strontium	Sr	2,54
»	forgé . . .	7,79	Tantale	Ta	»
Gallium	Ga	5,95	Tellure	Te	6,24
Glucinium	Gl	2,10	Thallium	Tl	11,86
Indium	In	7,40	Thorium	Th	10,099
Iode	I.	4,95	Titane	Ti	5,30
Iridium	Ir.	22,40	Tungstène	W.	17,60
Lanthane	La	»	Uranium	U.	18,33 à 18,40
Lithium	Li	0,59	Zinc	Zn	7,19
Magnésium	Mg	1,74	Zirconium	Zr	7,14

Substances diverses du règne animal

Blanc de baleine	0,94	Graisse de porc	0,94
Cire	0,96	Ivoire.	1,93
Corail.	2,69	Laine.	1,61
Corne.	1,31	Os	1,80 à 2,00
Corps humain (moyenne).	1,07	Perles.	2,68 à 2,75
Graisse de mouton. . . .	0,92	Nacre de perles	2,74 à 2,78

Digitized by Google

Densités de substances diverses

Composés métalliques

Acier doux	7,833
Acier fondu étiré	7,717
Acier forgé	7,840
Acier trempé	7,816
Alliage Bourbouze	2,85
(Soudure d'aluminium) (aluminium, étain).	
Bronze des canons	8,44 à 9,24
Bronze des tam-tam	8,813
Cuivre 90, aluminium 10	7,70
Cuivre et zinc (laiton)	7,30
Fonte blanche	7,44 à 7,84
Fonte grise	6,79 à 7,05
Maillechort	8,615 à 8,65

Verres et Porcelaines

Cristal	3,330
Crown ordinaire	2,447
Crown de Clichy	2,657
Flint Faraday	4,358
Flint Guinand	3,589
Flint lourd	4,056
Porcelaine de Chine	2,384
» de Sèvres	2,242
» de Saxe	2,493
Strass	4,110
Verre à glaces	2,463
» à vitres	2,527

Roches diverses

Albâtre calcaire	2,69 à 2,78
Albâtre gypseux	2,26 à 2,32
Ardoise (schiste)	2,64 à 2,90
Calcaire lithographique	2,67 à 2,70
Calcaire grossier en fragmts	1,94 à 2,06
Fluorine	3,14 à 3,19
Granit	2,63 à 2,75
Grès quartzeux	2,55 à 2,65
Gypse (pierre à plâtre)	2,17 à 2,20
Marbres calcaires	2,65 à 2,74
Porphyre	2,61 à 2,94
Serpentine	2,49 à 2,66

Combustibles minéraux

Anthracite	1,34 à 1,46
Bitume (asphalte, etc.)	0,83 à 1,16
Houille	1,28 à 1,36
Lignites	1,10 à 1,35

Bois

Acajou	0,56 à 0,85
Bois de fer	1,02 à 1,09
Buis de France	0,91
Buis de Hollande	1,32
Cèdre du Liban	0,49 à 0,66
Chêne	0,61 à 1,17
Ebène	1,12 à 1,21
Ecorce de liège	0,24
Frêne	0,70 à 0,84
Grenadier	1,35
Hêtre	0,66 à 0,82
If	0,80
Noyer	0,68 à 0,92
Olivier	0,68
Orme	0,55 à 0,76
Peuplier	0,39 à 0,51
Pin	0,55 à 0,74
Platane	0,65
Poirier	0,73
Pommier	0,73
Prunier	0,87
Sapin	0,49 à 0,66
Tilleul	0,60

Substances diverses du règne végétal

Amidon	1,53
Caoutchouc	0,99
Coton	1,95
Gutta-percha	0,97
Lin	1,79
Résine copal	1,05

Digitized by Google

ESSAIS DES VINS

Méthode de Gay-Lussac

L'instrument le plus fréquemment adopté pour rechercher la richesse d'un liquide spiritueux, permettant de reconnaître le nombre de parties en volume d'alcool pur qu'il contient a été imaginé par Gay-Lussac. Cet instrument, dont la graduation est conforme à notre système décimal, est désigné sous le nom d'alcoomètre centésimal. Il se compose, comme le densimètre de Brisson, d'un flotteur cylindrique en verre, à l'extrémité supérieur duquel est soudé un tube cylindrique de 3 ou 4 millimètres de diamètre. La partie inférieure est terminée par une ampoule dans laquelle on introduit du mercure pour lester l'instrument. Ce lest doit être réglé de manière à ce que le point d'affleurement dans l'eau distillée à la température de 15°, soit au bas du tube et que le tracé du zéro de l'échelle coïncide avec ce point. Le point 100 correspond au point d'affleurement dans l'alcool absolu à la même température. Pour les points d'affleurement intermédiaires correspondant, pour chacun d'eux, à un mélange d'eau distillée et d'alcool pur, dans des proportions bien déterminées, on fait plusieurs mélanges de ces liquides contenant cent parties en volume, mais dans des proportions telles que l'alcool pur y entre respectivement pour 95, 90, 85, 80, jusqu'à 5. En plongeant successivement l'instrument dans chacun de ces liquides amenés à 15°, on marquera 95, 90, 85, 80... 5 aux différents points d'affleurement. On termine l'échelle en divisant en cinq parties les intervalles compris entre deux divisions consécutives préalables obtenues dans les différents mélanges.

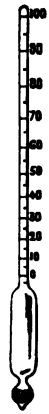


Fig. 66

Chaque division de l'échelle ainsi obtenue représentera un centième en volume d'alcool pur.

Il suffira donc de plonger l'instrument dans un liquide spiritueux pour qu'il indique la richesse alcoolique en centièmes du

Digitized by Google

volume total, pourvu que ce liquide ne contienne aucune matière capable de modifier sa densité.

On sait que lorsqu'on fait un mélange d'eau et d'alcool il se produit une contraction qui est variable selon les proportions respectives des deux liquides. Il résulte de ce fait que les intervalles compris entre chaque degré n'ont pas la même longueur : ceux qui correspondent aux mélanges faibles en alcool sont beaucoup plus petits; il faut donc, pour que les mesures se fassent avec exactitude, lorsque l'alcool est en très faible proportion, que le volume du flotteur soit tel, d'après Gay-Lussac, que le tube cylindrique qui porte la graduation, s'enfonce au moins de 5 à 6 millimètres dans un liquide dont la densité est égale à 0,910.

Pour éviter les incertitudes que l'on éprouve pour déterminer d'une façon rigoureuse les points d'affleurement correspondant aux différents mélanges dans lesquels est plongé successivement l'instrument, on devra avoir recours, comme pour la construction des échelles densimétriques, au procédé dont s'est servi de Montigny pour graduer les échelles des instruments qu'il destinait, dit Brisson, à éprouver les eaux-de-vie.

Nous rappelons que ce procédé consiste à marquer en dehors du liquide les échelles de ces divers instruments.

L'alcool absolu qui doit servir à faire les mélanges doit avoir une densité égale à 0,795 à 0°, l'eau à son maximum de densité. Son point d'ébullition doit se produire à la température de 78°,4, sous la pression barométrique de 0,760. Enfin la densité de cet alcool, dont la formule est C^2H^6O, doit être égale à 1,601.

COMPTE-GOUTTES DE M. DUCLAUX

M. Duclaux a fondé sur la théorie de la tension superficielle des liquides une méthode très simple d'analyse alcoométrique.

Sa méthode est basée sur cette observation que, à chaque mélange différent d'eau et d'alcool correspond une valeur différente de la tension superficielle. Il en résulte que si on fait écouler goutte à goutte des volumes égaux de ces mélanges, le nombre de gouttes sera différent pour chaque mélange et pourra par suite être caractéristique de ce mélange.

Le compte-goutte de M. Duclaux est une pipette ordinaire terminée par un tube très fin dont le diamètre est calculé de telle sorte que 5 centimètres cubes d'eau à 15° donnent exactement 100 gouttes.

Digitized by Google

En opérant sur divers mélanges d'eau et d'alcool, M. Duclaux a pu dresser une table marquant le nombre de gouttes correspondant aux divers degrés alcoométriques.

Voici quelques-uns des chiffres de cette table :

DEGRÉS alcoométriques	NOMBRE de gouttes	DEGRÉS alcoométriques	NOMBRE de gouttes
0.	100	11	147
1.	107	12	150,5
2.	113	13	154
3.	118	14	157
4.	122,5	15	160
5.	126,5	16	163,5
6.	130,5	17	167
7.	134	18	170
8.	137,5	19	173
9.	140,5	20	166
10.	144	25	192 (1)

ÉTUDE DE LA RICHESSE ALCOOLIQUE D'UN VIN

APPAREIL SALLERON

L'appareil Salleron (*fig. 76*) comprend :

1° Un alambic constitué par un ballon de verre B, chauffé par une lampe à alcool A.

2° Un serpentin, contenu dans un réfrigérant C et communiquant avec la chaudière au moyen d'un tube de caoutchouc D.

3° Une burette L portant un trait *a*.

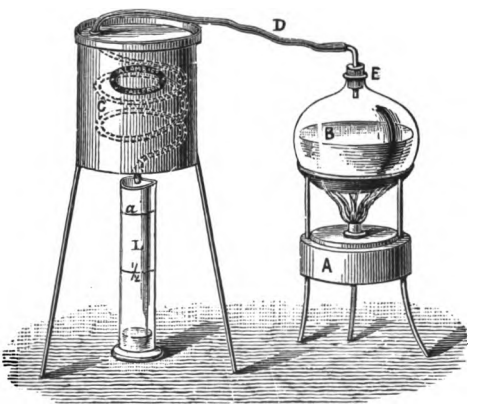


Fig. 76

Mode opératoire

Mesurer dans la burette L le liquide à essayer. A l'aide d'une pipette on amène exac-

(1) Voir *Annales de Physique et de Chimie*, 5e série, tome II, page 238.

Digitized by Google

tement le niveau devant le trait *a*, et l'on vide le contenu dans le ballon B. On répète une seconde fois la même opération. Il faut avoir soin de rincer la burette avec un peu d'eau distillée et de reverser le tout dans le ballon, de façon à distiller bien exactement deux mesures de vin.

On ferme alors le ballon B, on place la burette sous le serpentin; on verse de l'eau froide dans le réfrigérant et on commence la distillation. L'expérience montre que tout l'alcool a distillé lorsque la moitié du volume total du liquide s'est condensée. On continue la distillation jusqu'à ce que le niveau arrive au trait *a*. On agite et on laisse reposer un instant; enfin on plonge simultanément l'alcoomètre et le thermomètre.

On note les indications des deux instruments et l'on détermine, au moyen de tableaux qui accompagnent l'appareil, la richesse réelle du produit distillé. Mais il faut remarquer que tout l'alcool du liquide soumis à la distillation occupe maintenant un volume moitié moindre que dans le liquide lui-même. La richesse trouvée est donc double de celle de l'échantillon analysé; il faut par conséquent prendre la moitié du résultat obtenu.

Exemple. — L'alcoomètre marque 20° et le thermomètre 19; la richesse alcoolique correspondante est 18,8 et celle du liquide essayé 9,4.

Remarque. — Pour faire une observation avec les alcoomètres ou aréomètres, il est indispensable que ces instruments soient mouillés par le liquide. Il est nécessaire, pour cela que la tige de l'instrument soit nettoyée entre deux feuilles de papier buvard, sur lesquelles on a déposé une goutte de lessive de soude ou de potasse.

Il ne faut jamais lire les divisions en regardant par-dessus le liquide ni tenir compte du ménisque qui s'élève au-dessus de la surface de ce liquide.

Digitized by Google

TABLE des DENSITÉS des MÉLANGES d'EAU et d'ALCOOL ABSOLU

Dressée par le Bureau national des poids et mesures (1)

DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES
0,0	100.000		3,9	99.426	14	7,8	98.915	13
0,1	99.984	16	4,0	99.413	13	7,9	98.903	12
0,2	99.968	16	4,1	99.399	14	8,0	98.891	12
0,3	99.952	16	4,2	99.385	14	8,1	98.879	12
0,4	99.937	15	4,3	99.371	14	8,2	98.867	12
0,5	99.921	16	4,4	99.358	13	8,3	98.854	13
0,6	99.905	16	4,5	99.344	14	8,4	98.842	12
0,7	99.890	15	4,6	99.330	14	8,5	98.830	12
0,8	99.874	16	4,7	99.317	13	8,6	98.818	12
0,9	99.859	15	4,8	99.303	14	8,7	98.806	12
1,0	99.844	15	4,9	99.290	13	8,8	98.794	12
1,1	99.829	15	5,0	99.277	13	8,9	98.782	12
1,2	99.814	15	5,1	99.263	14	9,0	98.770	12
1,3	99.799	15	5,2	99.250	13	9,1	98.758	12
1,4	99.784	15	5,3	99.237	13	9,2	98.746	12
1,5	99.769	15	5,4	99.224	13	9,3	98.734	12
1,6	99.754	15	5,5	99.210	14	9,4	98.722	12
1,7	99.739	15	5,6	99.197	13	9,5	98.711	11
1,8	99.724	15	5,7	99.184	13	9,6	96.699	12
1,9	99.709	15	5,8	99.171	13	9,7	98.687	12
2,0	99.695	14	5,9	99.158	13	9,8	98.675	12
2,1	99.680	15	6,0	99.145	13	9,9	98.664	11
2,2	99.665	15	6,1	99.132	13	10,0	98.652	12
2,3	99.651	14	6,2	99.119	13	10,1	98.640	12
2,4	99.636	15	6,3	99.106	13	10,2	98.628	12
2,5	99.622	14	6,4	99.093	13	10,3	98.617	11
2,6	99.608	14	6,5	99.080	13	19,4	98.605	12
2,7	99.594	14	6,6	99.067	13	10,5	98.593	12
2,8	99.580	14	6,7	99 054	13	10,6	98.582	11
2,9	99.566	14	6,8	99.041	13	10,7	98.571	11
3,0	99.552	14	6,9	99.029	12	10,8	98.559	12
3,1	99.538	14	7,0	99.016	13	10,9	98.548	11
3,2	99.524	14	7,1	99.003	13	11,0	98.537	11
3,3	99.510	14	7,2	98.990	13	11,1	98.525	12
3,4	99.496	14	7,3	98.978	12	11,2	98.514	11
3,5	99.482	14	7,4	98.965	13	11,3	98.503	11
3,6	99.468	14	7,5	98.952	13	11,4	98.491	12
3,7	99.454	14	7,6	98.940	12	11,5	98.480	11
3,8	99.440	14	7,7	98.928	12	11,6	98.469	11

(1) Ces densités sont rapportées à l'eau à 15° centigrades et ramenées au vide.

Digitized by Google

DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES
11,7	98.458	11	16,6	97.933	11	21,5	97.437	10
11,8	98.446	12	16,7	97.923	10	21,6	97.427	10
11,9	98.435	11	16,8	97.913	10	21,7	97.417	10
12,0	98.424	11	16,9	97.902	11	21,8	97.407	10
12,1	98.413	11	17,0	97.892	10	21,9	97.397	10
12,2	98.402	11	17,1	97.882	10	22,0	97.387	10
12,3	98.391	11	17,2	97.872	10	22,1	97.377	10
12,4	98.380	11	17,3	97.862	10	22,2	97.367	10
12,5	98.369	11	17,4	87.851	11	22,3	97.356	11
12,6	98.358	11	17,5	97.841	10	22,4	97.346	10
12,7	98.347	11	17,6	97.831	10	22,5	97.336	10
12,8	98.336	11	17,7	97.821	10	22,6	97.326	10
12,9	98.325	11	17,8	97.811	10	22,7	97.316	10
13,0	98.314	11	17,9	97.800	11	22,8	97.306	10
13,1	98.303	11	18,0	97.790	10	22,9	97.296	10
13,2	98.292	11	18,1	97.780	10	23,0	97.286	10
13,3	98.281	11	18,2	97.770	10	23,1	97.276	10
13,4	98.270	11	18,3	97.760	10	23,2	97.266	10
13,5	98.260	10	18,4	97.749	11	23,3	97.256	10
13,6	98.249	11	18,5	97.739	10	23,4	97.246	10
13.7	98.238	11	18,6	97.729	10	23,5	97.236	10
13,8	98.227	11	18,7	97.719	10	23,6	97.225	11
13,9	98.217	10	18,8	97.709	10	23,7	97.215	10
14,0	98.206	11	18,9	97.698	11	23,8	97.205	10
14,1	98.195	11	19,0	97.688	10	23,9	97.195	10
14,2	98.184	11	19,1	97.678	10	24,0	97.185	10
14,3	98.174	10	19,2	97.668	10	24,1	97.175	10
14,4	98.163	10	19,3	97.658	40	24,2	97.165	10
14,5	98.152	11	19,4	97.648	10	24,3	97.155	10
14,6	98.142	10	19,5	97.637	11	24,4	97.144	11
14,7	98.131	11	19,6	97.627	10	24,5	97.134	10
14,8	98.121	10	19,7	97.617	10	24.6	97.124	10
14,9	98.110	11	19,8	97.607	10	24,7	97.114	10
15,0	98.100	10	19,9	97.597	10	24,8	97.104	10
15,1	98.089	11	20,0	97.587	10	24,9	97.094	10
15,2	98.079	10	20,1	97.577	10	25,0	97.084	10
15,3	98.068	11	20,2	97.567	10	25,1	97.073	11
15,4	98.058	10	20,3	97.557	10	25,2	97.063	10
15,5	98.047	11	20,4	97.547	10	25,3	97.053	10
15,6	98.037	10	20,5	97.537	10	25,4	97.043	10
15,7	98.026	11	20,6	97.527	10	25,5	97.032	11
15,8	98.016	10	20,7	97.517	10	25,6	97.022	10
15,9	98.005	11	20,8	97.507	10	25,7	97.012	10
16,0	97.995	10	20,9	97.497	10	25,8	97.002	10
16,1	97.985	10	21,0	97.487	40	25,9	96.991	11
16,2	97.975	10	21,1	97.477	10	26,0	96.981	10
16,3	97.964	11	21,2	97.467	10	26.1	96.971	10
16,4	97.954	10	21,3	97.457	10	26,2	96.960	11
16,5	97.944	10	21,4	97.447	10	26,3	96.950	10

Digitized by Google

DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES
26,4								
26,5	96.939	11	31,3	96.392	12	36,2	95.758	14
26,6	96.929	10	31,4	96.380	12	36,3	95.744	14
26,7	96.918	11	31,5	96.368	12	36,4	95.730	14
26,8	96.908	10	31,6	96.356	12	36,5	95.716	14
26,9	96.897	11	31,7	96.344	12	36,6	95.702	14
27,0	96.887	10	31,8	96.331	13	36,7	95.688	14
27,1	96.876	11	31,9	96.319	12	36,8	95.673	15
27,2	96.866	10	32,0	96.307	12	36,9	95.659	14
27,3	96.855	11	32,1	96.295	12	37,0	95.645	14
27,4	96.845	10	32,2	96.282	13	37,1	95.631	14
27,5	96.834	11	32,3	96.270	12	37,2	95.616	15
27,6	96.824	10	32,4	96.258	12	37,3	95.602	14
27,7	96.813	11	32,5	96.245	13	37,4	95.588	14
27,8	96.802	11	32,6	96.233	12	37,5	95.573	15
27,9	96.791	11	32,7	96.221	12	37,6	95.559	14
28,0	96.780	11	32,8	96.208	13	37,7	95.544	15
28,1	96.769	11	32,9	96.196	12	37,8	95.529	15
28,2	96.758	11	33,0	96.183	13	37,9	95.514	15
28,3	96.747	11	33,1	96.170	13	38,0	95.499	15
28,4	96.736	11	33,2	96.157	13	38,1	95.484	15
28,5	96.725	11	33,3	96.145	12	38,2	95.469	15
28,6	96.714	11	33,4	96.132	13	38,3	95.455	14
28,7	96.703	11	33,5	96.119	13	38,4	95.440	15
28,8	96.692	11	33,6	96.107	12	38,5	95.425	15
28,9	96.681	11	33,7	96.094	13	38,6	95.410	15
29,0	96.670	11	33,8	96.081	13	38,7	95.395	15
29,1	96.659	11	33,9	96.068	13	38,8	95.380	15
29,2	96.648	11	34,0	96.055	13	38,9	95.365	15
29,3	96.637	11	34,1	96.042	13	39,0	95.350	15
29,4	96.625	12	34,2	96.029	13	39,1	95.335	15
29,5	96.614	11	34,3	96.016	13	39,2	95.320	15
29,6	96.603	11	34,4	96.003	13	39,3	95.305	15
29,7	96.591	12	34,5	95.989	14	39,4	95.290	15
29,8	96.580	11	34,6	95.976	13	39,5	95.274	16
29,9	96.568	12	34,7	95.963	13	39,6	95.259	15
30,0	96.557	11	34,8	95.950	13	39,7	95.244	15
30,1	96.545	12	34,9	95.936	14	39,8	95.228	16
30,2	96.534	11	35,0	95.923	13	39,9	95.212	16
30,3	96.522	12	35,1	95.909	13	40,0	95.196	16
30,4	96.510	12	35,2	95.895	13	40,1	95.180	16
30,5	96.499	11	35,3	95.882	13	40,2	95.164	16
30,6	96.487	12	35,4	95.868	14	40,3	95.148	16
30,7	96.475	12	35,5	95.854	14	40,4	95.132	16
30,8	96.463	12	35,6	95.841	13	40,5	95.116	16
30,9	96.452	11	35,7	95.827	14	40,6	95.100	16
31,0	96.440	12	35,8	95.813	14	40,7	95.084	16
31,1	96.428	12	35,9	95.800	13	40,8	95.068	16
31,2	96.416	12	36,0	95.786	14	40,9	95.052	16
	96.404	12	36,1	95.772	14	41,0	95.036	16

Digitized by Google

DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES
41,1	95.020	16	46,0	94.183	18	50,9	93.261	20
41.2	95.004	16	46,1	94.165	18	51,0	93.241	20
41,3	94.987	17	46,2	94.147	18	51,1	93.221	20
41,4	94.971	16	46,3	94.129	18	51,2	93.201	20
41,5	94.955	16	46,4	94.111	18	51,3	93.281	20
41,6	94.938	17	46,5	94.093	18	51,4	93.161	20
41,7	94.922	16	46,6	94.075	18	51,5	93.141	20
41,8	94.905	17	46,7	94.056	19	51,6	93.121	20
41,9	94.889	16	46,8	94.038	18	51,7	93.101	20
42,0	94.872	17	46,9	94.020	18	51,8	93.081	20
42,1	94.856	16	47,0	94.002	18	51,9	92.061	20
42,2	94.839	17	47,1	93.983	19	52,0	93.041	20
42,3	94.822	17	47,2	93.965	18	52,1	93.021	20
42,4	94.806	16	47,3	93.947	18	52,2	93.001	20
42,5	94.789	17	47,4	93.929	18	52,3	92.980	21
42,6	94.772	17	47,5	93.910	19	52,4	93.960	20
42.7	94.756	16	47,6	93.892	18	52,5	92.940	20
42,8	94.739	17	47,7	93.873	19	52,6	92.919	21
42,9	94.722	17	47,8	93.854	19	52,7	92.899	20
43,0	94.705	17	47,9	93.836	18	52,8	92.878	21
43,1	94.688	17	48,0	93.817	19	52,9	92.858	20
43,2	94.671	17	48,1	93.798	19	53,0	92.837	21
43,3	94.654	17	48.2	93.780	18	53,1	92.817	20
43,4	94.637	17	48,3	93.761	19	53,2	92.796	21
43,5	94.620	17	48.4	93.742	19	53,3	92.775	21
43,6	94.603	17	48,5	93.723	19	53,4	92.755	20
43,7	94.586	17	48,6	93.705	18	53,5	92.734	21
43,8	94.569	17	48,7	93.686	19	53,6	92.713	21
43,9	94.552	17	48,8	93.667	19	53,7	92.692	21
44,0	94.535	17	48,9	93.648	19	53,8	92.672	20
44,1	94.517	18	49.0	93.629	19	53,9	92.651	21
44,2	94.500	17	49,1	93 610	19	54,0	91.630	21
44,3	94.483	17	49,2	93.591	19	54,1	92.609	21
44,4	94.466	17	49,3	93.572	19	54,2	92.588	21
44,5	94.448	18	49,4	93.553	19	54,3	92.567	21
44,6	94.431	17	49,5	93.533	20	54,4	92.546	21
44,7	94.414	17	49,6	93.514	19	54,5	92.525	21
44,8	94.396	18	49,7	93.495	19	54,6	92.504	21
44,9	94.379	17	49,8	93.476	19	54,7	92.483	21
45,0	94.361	18	49,9	93.456	20	58,8	92.462	21
45,1	94.344	17	50,0	93.437	19	54,9	92.441	21
45,2	94.326	18	50,1	93.418	19	55,0	92.520	21
45,3	94.308	18	50,2	93.398	20	55,1	92.399	21
45,4	94.291	17	50,3	93.379	19	55,2	92.378	21
45,5	94.273	18	50,4	93.359	20	55,3	92.357	21
45,6	94.255	18	50,5	93.340	19	55,4	92.336	21
45,7	94.237	18	50,6	93.320	20	55,5	92.315	21
45,8	94.219	18	50.7	93.300	29	55,6	92.293	22
45,9	94.201	18	50,8	93.281	19	55,7	92.272	21

Digitized by Google

DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES
55,8	92.261	21	60,7	91.197	22	65,6	90.084	24
55,9	92.230	21	60,8	91.175	22	65,7	90.061	23
56,0	92.209	21	60,9	91.152	22	65,8	90.038	23
56,1	92.188	21	51,0	91.130	22	55,9	90.014	24
56,2	92.167	21	61,1	91.108	22	66,0	89.991	23
56,3	92.146	21	61,2	91.086	22	66,1	89.968	23
56,4	92.124	22	61,3	91.063	22	66,2	89.944	24
56,5	92.103	21	51,4	91.041	22	66,3	89.921	23
56,6	92.082	21	61,5	91.019	22	66,4	89.897	24
56,7	92.061	21	61,6	90.997	22	66,5	89.874	23
55,8	92.039	22	61,7	90.974	23	66,6	89.850	14
56,9	92.018	21	61,8	90.952	22	66,7	89.826	24
57,0	91.997	21	61,9	90.930	22	66,8	89.802	24
57,1	91.976	21	62,0	90.907	23	66,9	89.779	13
57,2	91.954	22	62,1	90.885	22	67,0	89.755	24
57,3	91.933	21	62,2	90.862	23	67,1	89.731	24
57,4	91.912	21	62,3	90.840	22	67,2	89.707	24
57,5	91.890	22	62,4	90.817	23	67,3	89.683	24
57,6	91.869	21	62,5	90.795	22	67,4	89.660	23
57,7	91.848	21	62,6	90.772	23	67,5	89.636	24
57,8	91.827	21	62,7	90.750	22	67,6	89.588	24
57,9	91.805	22	62,8	90.727	23	67,6	89.612	24
58,0	91.784	21	62,9	90.705	22	67,7	89.588	24
58,1	91.763	21	63,0	90.682	23	67,8	89.564	24
58,2	91.741	22	63,1	90.659	23	67,9	89.540	24
58,3	91.720	21	63,2	90.737	12	68,0	89.516	24
58,4	91.698	22	63,3	90.614	23	68,1	89.492	24
58,5	91.677	11	63,4	90.591	23	68,2	89.468	24
58,6	91.655	22	63,5	90.568	23	68,3	89.444	24
58,7	91.634	21	63,6	90.546	22	68,4	89.419	25
58,8	91.612	22	63,7	90.523	23	68,5	89.395	24
58,9	91.591	21	63,8	90.500	23	68,6	89.371	24
59,0	91.569	22	63,9	90.477	33	68.7	89.347	24
59,1	91.547	22	64,0	90.454	23	68,8	89.322	25
59,2	91.525	22	64,1	90.432	23	68,9	89.298	24
59,3	91.504	21	64,2	90.408	23	69,0	89.274	24
59,4	91.482	22	64,3	90.385	23	69.1	89.249	25
59,5	91.460	22	64,4	90.362	23	69,2	89.225	24
59,6	91.438	22	64,5	90.339	23	69,3	89.200	25
59,7	91.417	21	64,6	90.316	23	69,4	89.176	24
59,8	91.395	22	64,7	90.293	23	69,5	89.151	25
59,9	91.373	22	64,8	90.270	23	69,6	89.127	24
60,0	91.351	22	64,9	90.247	23	69,7	89.102	25
60,1	91.329	22	65,0	90.224	23	69,8	89.078	24
60,2	91.307	22	65,1	90.201	23	69,9	89.053	25
60,3	91.285	22	65,2	90.177	24	70,0	89.029	24
60,4	91.263	22	65,3	90.154	23	70,1	88.004	25
60,5	91.241	22	65,4	90.131	23	70,2	88.979	25
60,6	91.220	22	65,5	90.108	23	70,3	88.955	24

Digitized by Google

DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES
70,4	88.930	25	75,3	87.684	27	80,2	86.360	28
70,5	88.905	25	75,4	87.658	26	80,3	86.333	27
70,6	88.881	24	75,5	87.632	26	80,4	86.305	28
70,7	88.856	25	75,6	87.606	26	80,5	86.277	28
70,8	88.831	25	75,7	87.579	27	80.6	86.249	28
70,9	88.806	25	75,8	87.553	26	80,7	86.221	28
71,0	88.781	25	75,9	87.527	26	80,8	86.193	28
71,1	88.756	25	76,0	87.500	27	80,9	86.165	28
71,2	88.731	25	76,1	87.474	26	81,0	86.137	28
71,3	88.706	25	76,2	87.447	27	81,1	86.109	28
71,4	88.681	25	76,3	87.421	26	81,2	86.081	28
71,5	88.656	25	76,4	87.394	27	81,3	86.052	29
71,6	88.631	25	76,5	87.367	27	81,4	86.024	28
71,7	88.606	25	76,6	87.341	26	81,5	86.996	28
71,8	88.581	25	76,7	87.314	27	81,6	85.968	28
71,9	88.556	25	76,8	87.287	27	81,7	85.939	29
72,0	88.531	25	76,9	87.260	27	81,8	85.911	28
72,1	88.506	25	77,0	87.234	26	81,9	85.883	28
72,2	88.480	26	77,1	87.207	27	82,0	85.854	29
72,3	88.455	25	77,2	87.180	27	82,1	85.826	28
72,4	88.430	25	77,3	87.153	27	82,2	85.797	29
72,5	88.405	25	77,4	87.127	26	82,3	85.769	28
72,6	88.379	26	77,5	87.100	27	82,4	85.740	29
72,7	88.354	25	77,6	87.073	27	82,5	85.712	28
72,8	88.329	25	77,7	87.046	27	82,6	85.683	29
72,9	88.303	26	77,8	87.019	27	82,7	85.654	29
73,0	88.278	25	77,9	86.992	27	82,8	85.625	29
73,1	88.252	26	78,0	86.965	27	82,9	85.596	29
73,2	88.227	25	78,1	86.938	27	83,0	85.567	29
73,3	88.201	26	78,2	86.911	27	83,1	85.538	29
73,4	88.176	25	78,3	86.884	27	83,2	85.509	29
73,5	88.150	26	78,4	86.856	28	83,3	85.480	29
73,6	88.125	25	78,5	86.829	27	83,4	85.451	29
73,7	88.099	26	78,6	86.802	27	83,5	85.421	30
73,8	88.074	25	78,7	86.774	28	83,6	85.392	29
73,9	88.048	26	78,8	86.747	27	83,7	85.363	29
74,0	88.022	26	78,9	86.719	28	83,8	85.334	29
74,1	87.996	26	79,0	86.692	27	83,9	85.304	30
74,2	87.970	26	79,1	86.664	28	84,0	85.275	29
74,3	87.944	26	79,2	86.637	27	84,1	85.246	29
74,4	87.919	25	79,3	86.609	28	84,2	85.216	30
74,5	87.893	26	79,4	86.582	27	84,3	85.187	29
74,6	87.867	25	79,5	86.554	28	84,4	85.157	30
74,7	87.841	26	79,6	86.527	27	84,5	85.127	30
74,8	87.815	26	79,7	86.499	28	84,6	85.098	29
74,9	87.789	26	79,8	86.472	27	84,7	85.068	30
75,0	87.763	26	80,9	86.444	28	84,8	85.038	30
75,1	87.737	26	80,0	86.416	28	84,9	85.008	30
75,2	87.711	26	80,1	86.388	28	85,0	84.979	30

Digitized by Google

DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES	DEGRÉS	DENSITÉS	DIFFÉRENCES
85,1								
85,2	84.949	30	90,1	83.382	33	95,1	81.602	39
85,3	84.919	30	90,2	83.349	33	95,2	81.563	39
85,4	84.889	30	90,3	83.316	33	95,3	81.525	38
85,5	84.859	30	90,4	83.282	34	95,4	81.486	39
85,6	84.829	30	90,5	83.249	33	95,5	81.447	39
85,7	84.799	30	90,6	83.216	33	95,6	81.407	40
85,8	84.769	30	90,7	83.182	34	95,7	81.367	40
85,9	84.738	31	90,8	83.149	33	95,8	81.326	41
86,0	84.707	30	90,9	83.115	34	95,9	81.286	40
86,1	84.677	30	91,0	83.081	34	96,0	81.245	41
86,2	84.647	30	91,1	83.048	33	96,1	81.205	40
86,3	84.617	31	91,2	83.014	34	96,2	81.164	41
86,4	84.587	30	91,3	82.980	34	96,3	81.123	41
86,5	84.557	30	81,4	82.946	34	96,4	81.081	42
86,6	84.526	31	91.5	82.911	35	96,5	81.040	41
86,7	84.496	30	91,6	82.877	34	96,6	80.998	42
86,8	84.465	31	91,7	82.843	34	96,7	80.957	41
86,9	84.434	31	91,8	82.808	35	96,8	80.915	42
87,0	84.403	31	91,9	82.773	35	96,9	80.872	43
87,1	84.372	31	92,0	82.738	35	97,0	80.829	43
87,2	84.341	31	92,1	82.703	35	97,1	80.786	43
87,3	84.310	31	92,2	82.668	35	97,2	80.743	43
87,4	84.289	31	92,3	82.633	35	97,3	80.700	43
87,5	84.258	31	92,4	82.597	36	97,4	80.656	44
87,6	84.216	32	92,5	82.562	35	97,5	80.613	43
87,7	84.185	31	92,6	82.527	35	97,6	80.569	44
87,8	84.154	31	92,7	82.491	36	97,7	80.524	45
87,9	84.123	31	92,8	82.450	35	97,8	80.480	44
88,0	84.091	32	92,9	82.420	36	97,9	80.435	45
88,1	84.060	31	93,0	82.385	35	98,0	80.390	45
88,2	84.028	32	93,1	82.349	36	98,1	80.345	45
88,3	83.997	31	93,2	82.313	36	98,2	80.299	46
88,4	83.965	32	93,3	82.277	36	98,3	80.254	45
88,5	83.933	32	93,4	82.240	37	98,4	80.208	46
88,6	83.901	32	93,5	82.204	36	98,5	80.161	47
88,7	83.869	32	93,6	82.168	36	98,6	80.115	46
88,8	83.837	32	93,7	82.131	37	98,7	80.068	47
88,9	82.805	32	93,8	82.094	37	98,8	80.021	47
89,0	83.773	32	93,9	82.057	37	98,9	79.974	47
89,1	83.741	32	94,0	82.020	37	99,0	79.926	48
89,2	83.708	33	94,1	81.982	38	99,1	79.878	48
89,3	83.676	32	94,2	81.945	37	99,2	79.829	49
89,4	83.644	32	94,3	81.907	38	99,3	79.781	48
89,5	83.611	33	94,4	81.870	37	99,4	79.732	49
89,6	83.579	32	94,5	81.832	38	99,5	79.683	49
89,7	83.546	33	94,6	81.794	38	99,6	79.634	49
89,8	83.513	33	94,7	81.756	38	99,7	79.584	50
89,9	83.481	32	94,8	81.718	38	99,8	79.534	50
90,0	83.448	33	94,9	81.679	39	99,9	79.484	50
	83.415	33	95,0	81.641	38	100,0	79.433	51

Digitized by Google

CORRECTIONS à FAIRE SUBIR à L'INDICATION de L'ALCOOMÈTRE

suivant la température du liquide

Indications du thermomètre

DEGRÉS A AJOUTER

Indications de l'alcoomètre	10°	11°	12°	13°	14°	15°
1	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0
2	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0
3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0
4	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
8	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
9	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0
10	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0
11	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0
12	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0
13	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0
14	0,9	0,7	0,6	0,4	0,2	0
15	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0

Indications de l'alcoomètre	10°	11°	12°	13°	14°	15°
16	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
17	1,1	0,9	0,6	0,4	0,2	0
18	1,2	1	0,7	0,5	0,2	0
19	1,2	1	0,7	0,5	0,2	0
20	1,3	1	0,7	0,5	0,2	0
21	1,4	1,1	0,8	0,5	0,2	0
22	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0
23	1,6	1,3	1	0,7	0,3	0
24	1,7	1,4	1,1	0,7	0,3	0
25	1,8	1,5	1,1	0,8	0,3	0
26	1,9	1,6	1,2	0,8	0,4	0
27	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0
28	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0
29	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0
30	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0

Digitized by Google

INDICATIONS DE L'ALCOOMÈTRE

Degrés à retrancher

Ind. du thermomèt.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Ind. du thermomèt.
16	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	16
17	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	3,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	17
18	0,3	0,3	0 3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,2	1,2	18
19	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	5,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,0	19
20	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,5	0,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	2	20
21	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	2,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2 3	2,4	21
22	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,8	2	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,6	2,7	2 7	2,8	22
23	0,8	0,9	0,9	0,9	1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2	2,1	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	23
24	0,9	1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,9	3,1	3,2	3,2	3,4	3,5	3,6	24
25	1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3	3,1	2,3	3,3	3,4	3,5	3,7	3,7	3,8	3,9	25
26	1	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,3	3,4	3,6	3,7	3,8	4	4,1	4,2	4,3	26
27	1	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2 7	2,9	3	3,2	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,7	27
28	1	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,7	1,8	3	3,3	3,3	3,5	3,5	3,9	4	4	4,1	4,3	4,1	4,5	4,7	4,8	5	5,1	28
29	1	1,9	1,9	2	2,1	2,1	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8	2 9	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,9	5,1	3,2	5 3	5,5	29
30	1	2	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2 9	3	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,4	5,5	5,7	5,8	30

Digitized by Google

COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

LOI DE MARIOTTE

Énoncé. — Les volumes occupés par une même masse de gaz sont en raison inverse des pressions qu'elle supporte quand la température demeure constante.

Soient V et V′ deux de ces volumes, et H et H′ les deux pressions correspondantes. Les volumes étant en raison inverse des pressions, on aura la proportion suivante : V : V′ :: H′ : H ou $\frac{V}{V'} = \frac{H'}{H}$ que l'on peut énoncer ainsi : une masse de gaz restant à la même température, le produit de son volume par la pression qu'elle supporte est constant.

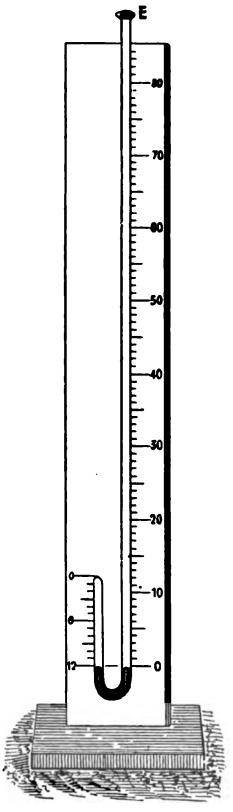


Fig. 66

L'appareil qui sert ordinairement pour vérifier cette loi, pour les pressions supérieures à la pression atmosphérique, se compose d'un tube à deux branches de longueurs inégales, la plus petite fermée, la plus grande ouverte à la partie supérieure (*fig. 66*).

La planchette sur laquelle est fixée le tube porte deux divisions : celle de la petite branche, servant à mesurer les volumes, est en parties d'égale capacité. Sa dernière division, le zéro, se trouvant à son extrémité supérieure, correspond avec le zéro de l'échelle de la plus longue branche, qui est divisée en parties d'égale longueur (*fig. 66*).

Digitized by Google

Mode opératoire

Introduire une petite quantité de mercure, de façon à ce que les deux ménisques soient dans le plan horizontal passant par la dernière division de la petite branche et le zéro de la grande. Le gaz enfermé ainsi sera à la pression atmosphérique (*fig. 67*).

Verser ensuite doucement du mercure par l'ouverture de la longue branche, de manière à amener la flèche du ménisque à la 2e division de la petite branche, on constatera que pour obtenir un volume réduit aux $\frac{8}{10}$ ou $\frac{4}{5}$, il a fallu verser du mercure dans la longue branche jusqu'à ce que la différence des deux niveaux soit égale au quart de la pression atmosphérique. Cette hauteur observée ajoutée à la hauteur barométrique, au moment de l'expérience, sera les $\frac{5}{4}$ de celle-ci. On constatera de même que pour réduire le volume à la moitié de ce qu'il était, la différence des deux niveaux sera égale à la pression atmosphérique.

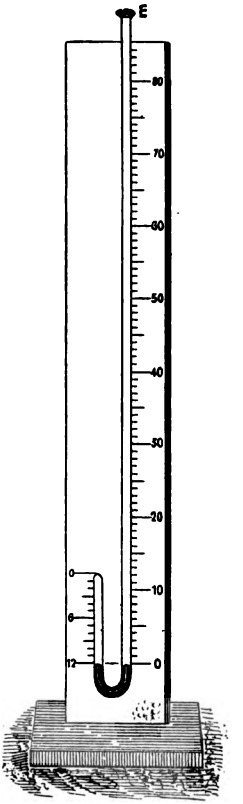


Fig. 67

Exemple. — Les volumes étant en raison inverse de la pression, en représentant par P′ la pression correspondante à V′, on aura la proposition suivante :

$$\frac{V'}{V} = \frac{P}{P'}, \text{ d'où } P' = \frac{VP}{V'}.$$

Soient : V volume primitif . . . . . = 100.
P pression atmosphérique. . . . . = 760.
V′ volume réduit . . . . . = 50.
P′ pression correspondante à V′ . . . = x.

Digitized by Google

on aura : $P' = \frac{760 \times 100}{50} = 1520$ millimètres = pression atmosphérique, plus la pression mesurée, ou $760^{m/m} \times 2$.

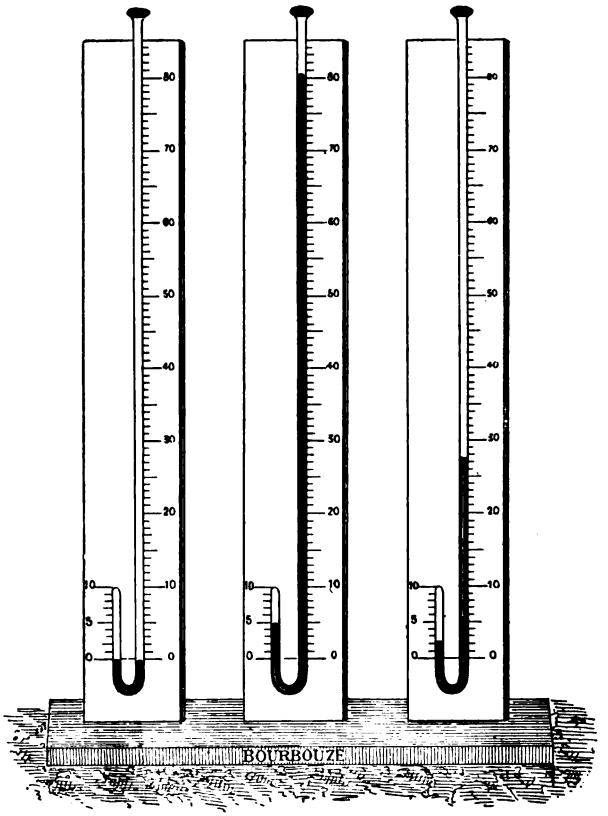


Fig. 68

Pour vérifier d'une manière plus rigoureuse la loi de Mariotte, on devra se servir d'un appareil disposé de telle façon qu'on puisse non seulement enfermer facilement un volume déterminé d'air sec, sous la pression barométrique, mais encore mesurer exactement la hauteur de la colonne de mercure nécessaire pour amener à V′ un volume d'air sec V.

L'appareil de Mariotte que nous avons disposé pour nos manipulations, se compose d'un tube semblable au tube ordinaire, mais auquel on a soudé deux robinets : l'un en R, à la partie supérieure de la petite branche qui est divisée en cent parties

Digitized by Google

d'égale capacité, l'autre en R′, à la partie inférieure. Ce dernier est destiné à régler la quantité de mercure nécessaire pour amener les deux ménisques dans un même plan horizontal passant par la 100e division de la petite branche et par le zéro de l'échelle mobile. Cette échelle D peut se déplacer parallèlement devant la grande branche (*fig. 69*).

Enfin deux index, dont l'un C peut glisser à frottement doux sur le tube ouvert et l'autre est fixé au zéro de l'échelle mobile, permettent de mesurer exactement la différence de niveau des deux ménisques.

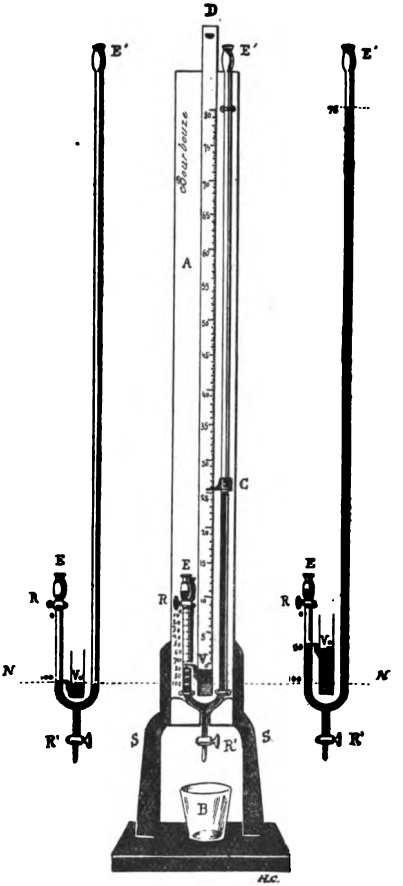


Fig. 69

Mode opératoire

Le robinet R étant ouvert et celui de la partie inférieure fermé, verser du mercure de façon à dépasser la ligne de niveau N N′. Régler à l'aide du robinet R′ la quantité de mercure nécessaire pour amener les deux ménisques dans un plan horizontal passant par la 100e division de la petite branche et par le zéro de l'échelle mobile. Fermer ensuite le robinet R. Le gaz ainsi enfermé sera rigoureusement à la pression atmosphérique.

Verser du mercure dans le grand tube jusqu'à ce que le ménisque du mercure dans la petite branche arrive à la 75e division. On aura ainsi le volume V réduit aux trois quarts.

Amener l'index correspondant au zéro de l'échelle graduée en coïncidence avec cette division.

Amener l'index C au niveau supérieur du mercure.

Digitized by Google

Lire sur l'échelle la position de cet index.

Soit h la hauteur lue.

Soit H la pression atmosphérique au même moment.

La pression de l'air dans la petite branche sera mesurée par $H + h$.

Vérification de la loi de Mariotte pour les pressions inférieures à celles de l'atmosphère

Pour vérifier la loi de Mariotte pour des pressions inférieures à une atmosphère, on se sert d'un baromètre à cuvette profonde. Le tube de ce baromètre porte deux divisions, l'une en parties d'égale capacité, l'autre en millimètres (*fig. 70*).

La mesure de la colonne verticale du mercure soulevé ainsi que la mesure du volume de l'air contenu dans le tube se font facilement et rapidement à l'aide de cette double graduation.

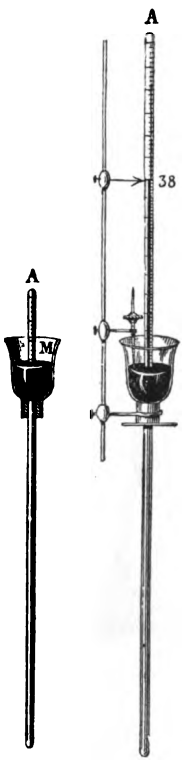


Fig. 70

Mode opératoire

Enfoncer le tube A jusqu'à ce que les deux niveaux soient dans un même plan horizontal $n\,n'$. Dans ces conditions, l'air contenu dans le tube A sera réduit au volume qu'il occuperait à la pression atmosphérique observée au moment de l'expérience. Noter la division qui correspond au niveau $n\,n'$; on aura ainsi un volume d'air V à la pression H. Soulever le tube A de manière à ce que le volume V devienne double de ce qu'il était. On constatera alors que la colonne de mercure est montée, au-dessus du niveau extérieur, d'une quantité égale à la moitié de la hauteur barométrique. En retranchant la hauteur de la colonne soulevée de la hauteur barométrique, on aura la pression correspondante à V'.

Si l'on soulève à nouveau le tube, de façon à ce que le volume devienne triple de ce qu'il était sous la pression barométrique, on verra que

Digitized by Google

la colonne de mercure soulevée sera les $\frac{2}{3}$, d'où il résulte que la force élastique du gaz, dont le volume est ainsi triplé sera égale à la pression atmosphérique H, moins la hauteur de la colonne soulevée *h*.

H — *h* fera connaître la pression correspondant à ce nouveau volume V″.

On voit donc, d'après ce qui précède, que si le volume augmente de 2, 3... *n* fois son volume primitif, la colonne soulevée, pour chaque volume, sera égale à $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ ..... de la hauteur barométrique et que, par suite, la pression intérieure deviendra $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$..... de la pression primitive pour chaque expérience.

Exemple. — Soient V volume primitif. . . . . = 150
H pression barométrique . . = 759
V′ nouveau volume . . . . . = 450
H — *h* hauteur de la colonne soulevée . . . . . = 506

Les volumes étant en raison inverse des pressions, on aura :

$$\frac{V'}{V} = \frac{H}{H - h},$$

$$\text{d'où : } \frac{15 \times 759}{45} = 253 = 759 - 506,$$

$$\text{et par suite } VH = V'(H - h).$$

APPLICATION DE LA LOI DE MARIOTTE

Détermination de la densité des corps solides en poudre ou des corps qui ne peuvent être immergés dans un liquide

Méthode du voluménomètre

Cette méthode, dont le principe est dû au capitaine Say, a été modifiée par Regnault, qui donna à l'appareil la forme représentée par la figure ci-contre.

Le voluménomètre (*fig. 71*) se compose :

1° D'un ballon de verre B dans lequel on introduira le corps étudié;

2° Un manomètre à mercure M, connu sous le nom de manomètre Regnault.

Digitized by Google

Le ballon tient au manomètre au moyen d'un collier à gorge *c*.

La petite branche du manomètre présente une partie renflée *a*, comprise entre deux traits de repère marqués sur le verre.

Fig. 72

Positions du robinet

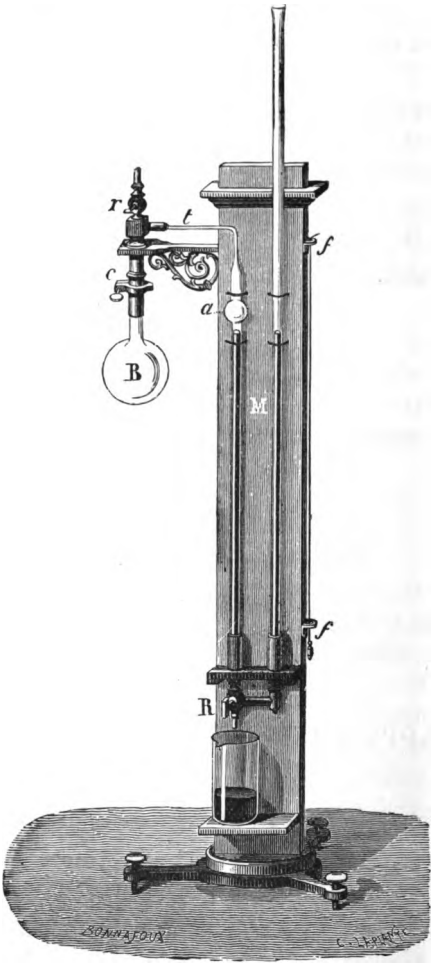


Fig. 71

Appelons *v* le volume compris entre les deux traits de repère.

Appelons V le volume du ballon et du tube de communication jusqu'au premier trait de repère.

Il faut commencer par déterminer ces deux volumes *v* et V.

Détermination de v. — 1° Le robinet à trois voies R étant dans la position (1), verser du mercure par la branche ouverte de

Digitized by Google

façon que le niveau du mercure dans la petite branche arrive au deuxième trait de repère.

Si, en même temps, la petite branche communique librement avec l'atmosphère (au moyen du robinet r), les deux niveaux du mercure sont dans un même plan horizontal.

2° On place le robinet R dans la position (4) de façon à faire écouler du mercure de la petite branche. On recueille soigneusement le mercure écoulé en l'arrêtant lorsque le mercure a atteint le trait inférieur. On pèse le mercure et on en déduit son volume v.

Détermination de V. — 1° On se replace dans la première position précédente, c'est-à-dire que le mercure arrive au trait supérieur dans la petite branche et est à la même hauteur dans la grande. On ferme le robinet r. On note à cet instant la pression barométrique.

L'air occupe alors un volume V à la pression H.

2° On met le robinet R dans la position (2) et on fait écouler le mercure jusqu'à ce que le niveau s'arrête au trait inférieur. On note la différence h des niveaux du mercure dans la grande branche et dans la petite.

L'air occupe dans cette deuxième expérience un volume $V + v$ à la pression $H - h$.

Appliquons la loi de Mariotte :

$$(V + v)(H - h) = VH,$$
$$\text{ou } VH - Vh + vH - vh = VH,$$
$$Vh = v(H - h),$$
$$V = v\frac{H - h}{h}.$$

Connaissant V et v, nous allons montrer comment on détermine la densité du corps étudié.

Mode opératoire

On pèse le ballon vide. On y place la substance étudiée. On pèse de nouveau. La différence donne le poids de cette substance. On adapte le ballon au manomètre au moyen du collier à gorge.

On ouvre le robinet supérieur r.

On verse du mercure par la branche ouverte jusqu'à ce que le niveau arrive au second trait. On ferme le robinet r. On note la pression atmosphérique. On place le robinet R dans la posi-

Digitized by Google

tion (2) et on fait couler le mercure jusqu'à ce que le niveau arrive en trait inférieur. On note la différence de niveau h.

Dans le premier cas, en appelant x le volume occupé par le corps, l'air occupait un volume $V - x$ à la pression H.

Dans le second cas, il occupe un volume $V + v - x$ à la pression $H - h$. On a, en appliquant la loi de Mariotte :

$$(V - x)\,H = (V + v - x)\,(H - h).$$

$$\text{d'où : } VH - xH = VH - Vh + vH - vh - Hx + hx,$$

$$x = \frac{(V+v)h - vH}{h} = V - v\,\frac{H - h}{h}.$$

Le poids spécifique cherché sera, en appelant p le poids : $\frac{p}{x}$.

On peut également opérer par compression.

Dans une première expérience, le robinet supérieur étant ouvert, on amène le mercure au trait inférieur.

On ferme le robinet r.

On verse du mercure dans la grande branche, de façon à amener le niveau au trait supérieur. Soit h' la différence des deux niveaux.

Dans le premier cas, l'air occupe un volume $V + v - x$ à la pression H.

Dans le second, il occupe un volume $V - x$ à la pression $H + h'$. On a donc :

$$(V + v - x)\,H = (V - x)\,(H + h').$$

$$\text{d'où : } x = V - v\,\frac{H}{h'},$$

Remarques. — Il faut avoir soin d'opérer à température constante. Il faut également que l'air du ballon et la substance sur laquelle on opère soient bien desséchés.

Enfin le voluménomètre donnerait de fort mauvais résultats si on opérait sur une substance capable d'absorber les gaz.

MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

Les appareils qui servent à mesurer la pression atmosphérique portent le nom de *Baromètres*.

Les différents baromètres peuvent se diviser en deux classes :

1° Les baromètres à mercure;

2° Les baromètres métalliques.

Digitized by Google

Nous ne parlerons pas de ces derniers, dont l'observation se borne à une simple lecture sur un cadran divisé.

Comme baromètres à mercure, nous citerons le baromètre fixe, ou baromètre de Regnault, le baromètre de Fortin et celui de Tonnelot.

MESURE DE LA HAUTEUR BAROMÉTRIQUE

Baromètre fixe (fig. 72)

Description. — Se compose simplement d'un tube barométrique, renversé sur une cuve à mercure et fixé à une planchette. Sur le bord de la cuve est fixée une petite potence qui soutient une vis à deux pointes.

Mode opératoire

1° On donne avec le doigt quelques petits chocs au baromètre pour que le mercure puisse vaincre les frottements qu'il rencontre dans le tube et que le ménisque supérieur puisse prendre sa valeur normale.

2° On commence par déterminer au cathétomètre la hauteur de la vis en ayant soin de la remonter, afin de bien dégager son extrémité de la surface du mercure.

3° On amène la vis à affleurer la surface de mercure, ce qu'on obtient en faisant coïncider la pointe avec son image dans le mercure. On vise au cathétomètre successivement l'extrémité supérieure de la vis et le sommet du ménisque dans le tube. En ajoutant à la hauteur ainsi trouvée la longueur de la vis, on a la valeur de la hauteur barométrique.

4° On lit la température t.

5° On fait la correction indiquée par la formule

$$H_0 = H\,(1 - 0{,}000181\ t).$$

H_0 est la pression cherchée à zéro.

H est la pression observée à t.

t est la température au moment de l'observation.

Digitized by Google

Un thermomètre placé à côté du tube sur la planchette indique la température au moment de l'observation.

Baromètre Fortin (fig. 73)

La cuvette est à fond mobile constitué par une peau de chamois contre laquelle vient s'appuyer, par l'intermédiaire d'un petit taquet de buis, une vis V (*fig. 74*). Le zéro de la graduation du tube correspond à l'extrémité d'une petite pointe d'ivoire P fixée à la partie supérieure de la monture métallique de la cuvette. Le tube barométrique est enfermé dans une gaîne métallique sur laquelle est tracée une division en millimètres. Un bouton fileté *c* commande un vernier dont le bord, taillé en biseau, peut être amené à la hauteur du ménisque mercuriel (*fig. 75*). Le vernier est en général au $\frac{1}{20}$. On évalue donc le $\frac{1}{20}$ de millimètre.

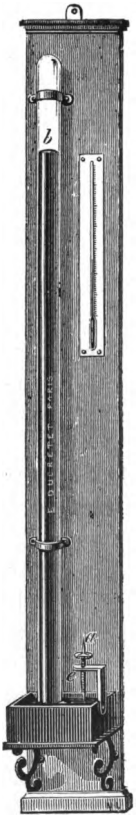


Fig. 72

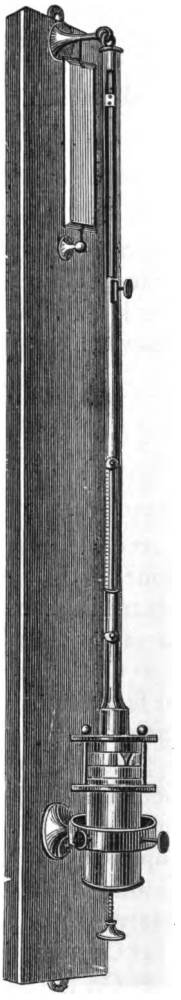


Fig. 73

Mode opératoire

1° On donne avec le doigt quelques petits chocs au baromètre afin de faire prendre au ménisque supérieur sa valeur normale.

2° On lit la température.

3° On fait affleurer la surface du mercure de la cuvette à l'extrémité de la pointe d'ivoire P, en agissant sur la vis V. Il est commode, pour constater ce contact, de placer derrière le tube une feuille de papier blanc.

4° On lit la position de zéro du vernier lorsque celui-ci a été

Digitized by Google

amené à être tangent par son bord supérieur au ménisque mercuriel dans le tube. On a ainsi la hauteur barométrique.

5° On fait les corrections indiquées plus loin.

Baromètre Tonnelot (fig. 76)

Dans le baromètre Tonnelot, la cuvette reste immobile.

L'échelle n'est pas divisée en millimètres, mais elle est compensée.

Pour comprendre le principe de cette graduation, considérons un tube barométrique renversé sur une cuve à mercure, soit AB le niveau du mercure dans la cuve lorsque la pression atmosphérique correspond à une hauteur de 760 millimètres de mercure (*fig.* 77).

Le zéro de la graduation correspond à ce niveau AB.

Supposons que la pression vienne à augmenter, le niveau du mercure dans le tube vient en M′ et dans la cuvette il baisse en A′ B′.

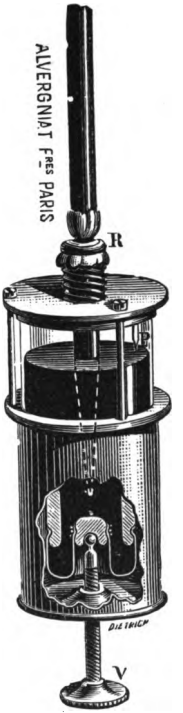


Fig. 74

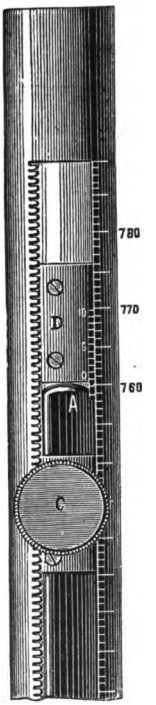


Fig. 75

Exprimons que le volume du mercure disparu dans la cuvette est égal au volume du mercure monté dans le tube.

Appelons s la section du tube.

S — de la cuvette.

x la différence des niveaux A B et A′ B′.

h la différence des niveaux M et M′.

On a :

$$s \times h = (S - s)\, x,$$

$$\text{d'où : } x = h \frac{s}{S - s}.$$

Supposons $S = 101$ fois s

$$\text{on a } x = h \frac{s}{100\, s} = \frac{h}{100}.$$

Digitized by Google

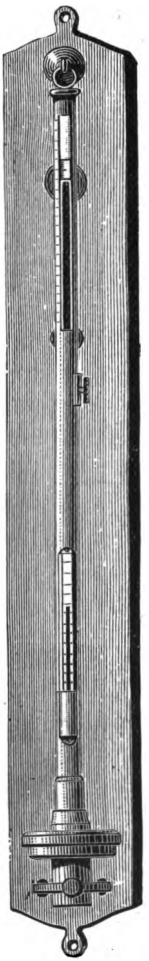


Fig. 76

La différence de pression est donc :

$$h + \frac{h}{100} = \frac{101}{100} h.$$

Donc, si le mercure a monté de 1 millimètre dans le tube, la pression a, en réalité, augmenté de $\frac{101}{100}$ millimètres. Donc, la graduation sera faite de façon qu'une longueur de 1 millimètre vaille $\frac{101}{100}$ de l'unité de graduation, qui est par suite égale à $\frac{100}{101}$ de millimètres.

CORRECTIONS BAROMÉTRIQUES

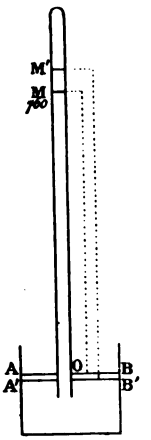


Fig. 77

Les corrections barométriques sont de trois espèces :

1° Corrections relatives à la température;

2° — de capillarité;

3° — de latitude et d'altitude.

1° Soit H_t la hauteur observée sur une échelle métallique dont le coefficient de dilatation linéaire est λ (environ 0,00002 pour le laiton), La hauteur véritable du mercure est $H_t(1 + \lambda t)$. Soit H_0 cette hauteur ramenée à zéro. En appelant m le coefficient de dilatation absolue du mercure (0,000181), on a :

$$H_0 = H_t \frac{(1 + \lambda t)}{1 + mt},$$

ou pratiquement, pour les variations de t qui ne sont pas trop grandes :

$$H_0 = H_t [1 - (m -) \lambda t),$$

ou sensiblement

$$H_0 = H_t [1 - 0{,}00016\, t).$$

Digitized by Google

Le tableau suivant donne les quantités à soustraire de la hauteur lue H_t pour avoir H_o.

Exemple. — Hauteur lue 750; température 9°.
Hauteur corrigée 750 — 1, 1 = 748,9.

Entre les pressions indiquées dans deux colonnes consécutives, on suppose que les quantités à soustraire sont proportionnelles aux différences de pression.

Tableau de corrections pour la réduction du baromètre à zéro

TEMPÉRATURE du baromètre	HAUTEUR DU BAROMÈTRE								
	700	710	720	730	740	750	760	770	780
0°	0,0‰	0,0‰	0,0‰	0,0‰	0,0‰	0,0‰	0,0‰	0,0‰	0,0‰
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,9
8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
10	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
11	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
12	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
13	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
14	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8
15	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9
16	1,2	1,8	1,9	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0
17	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1
18	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2
19	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
20	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5
21	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6
22	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8
23	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9
24	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0
25	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1
26	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3
27	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4
28	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5
29	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6
30	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8
31	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9
32	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0

Digitized by Google

La correction de la capillarité s'obtient en ajoutant à la hauteur barométrique observée la dépression capillaire, laquelle est donnée par la table suivante, à deux entrées.

Dans cette table sont indiquées, dans la première ligne, les hauteurs de la flèche du ménisque, c'est-à-dire la distance entre le sommet du ménisque mercuriel et le cercle de contact du mercure et du verre :

RAYON intérieur du tube	HAUTEUR DE LA FLÈCHE DU MÉNISQUE								
	0m/m2	0m/m3	0m/m4	0m/m5	0m/m6	0m/m7	0m/m8	0m/m9	1m/m0
m/m									
2,0	0,60	0,89	1,16	1,41	1,65	1,86	2,05	2,21	2,35
2,2	0,49	0,72	0,95	1,16	1,36	1,54	1,71	1,85	1,98
2,4	0,40	0,60	0,79	0,97	1,14	1,29	1,44	1,57	1,68
2,6	0,39	0,50	0,66	0,81	0,96	1,09	1,22	1,33	1,44
2,8	0,29	0,43	0,55	0,69	0,82	0,93	1,04	1,14	1,24
3,0	0,24	0,36	0,48	0,59	0,70	0.80	0,90	0,99	1,07
3,2	0,21	0,31	0,41	0,51	0,60	0,69	0,78	0,86	0,93
3,4	0,18	0,27	0,36	0,44	0,52	0,60	0,68	0,75	0,81
3,6	0,16	0,23	0,31	0,38	0,46	0,52	0,59	0,65	0,71
3,8	0,14	0,21	0,27	0,34	0,40	0,46	0,52	0,57	0,62
4,0	0,12	0,18	0,24	0,30	0,35	0,40	0,46	0,50	0,55
5,0	0,07	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,28	0,28	0,31
6,0	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18
7,0	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11

3° Dans certains cas, on éprouve la nécessité de rapporter toutes les observations barométriques à ce qu'elles seraient à une altitude et à une latitude déterminées. On choisit, en général, le niveau de la mer à la latitude de 45° et l'on applique la formule approchée suivante :

$$H^{mm}_{45} = H_{\varphi}\ (1 + 0{,}0026\ \mathrm{Cos}\,2\varphi)\ (1 + 0{,}0000003\ a).$$

H^{mm}_{45} est la pression cherchée,

H_{φ} — observée,

a — l'altitude du lieu d'observation.

φ — la latitude du lieu d'observation.

Digitized by Google

APPLICATIONS DU BAROMÈTRE

MESURE D'UNE HAUTEUR PAR LE BAROMÈTRE

Mode opératoire

Déterminer la hauteur barométrique H'_1 à la station inférieure ainsi que la température t'_1.

Déterminer H_2 et t_2 à la station supérieure.

Faire une nouvelle détermination à la station inférieure. Soient H''_1 et t''_1, on prend

$$H_1 = \frac{H'_1 + H''_1}{2} \text{ et } t_1 = \frac{t'_1 + t''_1}{2}.$$

Si l'on ne tient pas compte de la variation de l'accélération de la pesanteur, la différence de niveaux de deux stations est donnée par la formule

$$h = 18420^{m}(\log H_1 - \log H_2)\left[1 + 0{,}0039\,\frac{t_1 + t_2}{2}\right],$$

qui, jusqu'à une différence de hauteur de 1,000 mètres, peut se mettre sous la forme approchée plus commode

$$h = 16000\,\frac{H_1 - H_2}{H_1 + H_2}\left[1 + 0{,}0039\,\frac{t_1 + t_2}{2}\right].$$

Exemple numérique :

$$\left.\begin{array}{l} H_1 = 770{,}946 \\ H_2 = 768{,}75 \end{array}\right\} \text{ valeurs corrigées.}$$

$t_1 = 10°.$

$t_2 = 9°{,}5.$

$$h = 16000\,\frac{770{,}946 - 768{,}75}{770{,}946 + 768{,}75}\left[1 + 0{,}0039\,\frac{10 + 9{,}5}{2}\right],$$

d'où $h = 21^{m},015$.

Digitized by Google

CHALEUR

Thermométrie

CONSTRUCTION DES THERMOMÈTRES

Thermomètre étalon

Pour construire un thermomètre étalon, on devra choisir un tube parfaitement cylindrique. On sera assuré qu'il satisfait à cette condition lorsque l'on aura constaté qu'une colonne de mercure conserve la même longueur dans une portion quelconque du tube. Si l'on reconnaît que le tube n'est pas parfaitement cylindrique dans une longueur égale à celle que doit avoir la tige du thermomètre, on devra le rejeter, ou bien le diviser en parties d'égale capacité, soit par la méthode de Gay-Lussac, soit par celle de Regnault.

Nous ne croyons pas conseiller l'une ou l'autre de ces méthodes, qui sont plus théoriques que pratiques. Elles exigent en outre une très grande habileté de main, sans laquelle les erreurs commises sont beaucoup plus considérables que celles qui pourraient résulter d'un léger défaut de cylindricité du tube.

C'est pour lever les difficultés que l'on rencontre à faire usage des procédés que l'on vient d'indiquer que nous avons adopté pour nos manipulations la méthode de Despretz : non pas pour avoir un tube non cylindrique divisé en parties d'égale capacité, mais pour rechercher la partie cylindrique qui peut être utilisée pour construire un thermomètre étalon. Ce procédé de vérification consiste à faire glisser une colonne de mercure de 9 centimètres et demi environ dans le tube capillaire, qui a ordinairement 1 mètre.

Après avoir marqué les deux extrémités de la colonne par des points m m' sur le tube, on la fera glisser de manière à ce que l'extrémité m vienne prendre la position de m'; on procédera

Digitized by Google

ainsi pour toute la longueur du tube. Puis on prendra les longueurs comprises entre les intervalles donnés par le déplacement de la colonne.

La mesure de ces longueurs nous fera connaître approximativement la partie à conserver.

Cette opération terminée, on sépare à l'aide du couteau d'émailleur les parties défectueuses, puis on efface les points marqués sur le tube; on recommence ensuite à faire la mesure de la même colonne pour chaque déplacement successif de 5 millimètres en 5 millimètres environ; on sépare à nouveau les parties non cylindriques accusées par une différence finale de quart ou demi. On aura donc dans ces conditions un tube calibré à moins de $\frac{1}{1000}$ de millimètre près pour la longueur totale d'un tube de 30 centimètres.

Le tube ainsi calibré, on souffle à l'une des extrémités un cylindre dont la capacité devra être réglée suivant le nombre de degrés que l'on voudra obtenir, et à l'extrémité opposée une ampoule à pointe effilée.

Pour les thermomètres à expériences ordinaires, toutes ces manipulations sont superflues; la première opération suffit largement pour avoir des thermomètres de laboratoires sur les indications desquels on puisse répondre à $\frac{1}{5}$ de degrés près.

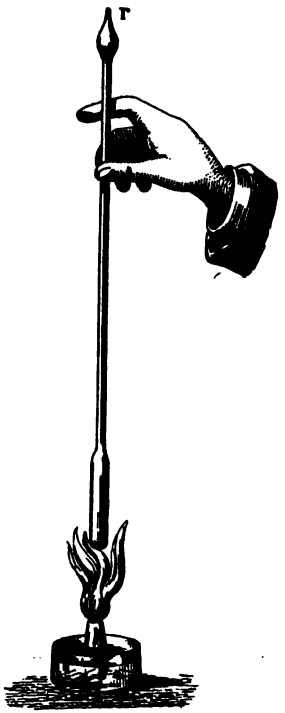


Fig. 78

Mode opératoire

Remplissage du tube. — Chauffer le réservoir du tube sur une lampe à alcool de manière à dilater et à chasser ainsi une portion de l'air qu'il contient (*fig. 78*).

Plonger ensuite la pointe effilée de l'ampoule dans un vase contenant du mercure pur et bien sec (*fig. 79*), et que l'on a préalablement chauffé légèrement.

L'air diminue de volume en se refroidissant, et la pres-

Digitized by Google

sion atmosphérique fait pénétrer une certaine quantité de mercure dans l'ampoule (1).

Retourner l'instrument et le tenir dans une position verticale (*fig. 80*). Si le tube n'est pas trop fin, la pression extérieure fera descendre une portion du mercure dans le réservoir inférieur.

Le chauffer à nouveau sur la lampe à alcool (*fig. 81*). Le mercure qui a pénétré entrera bientôt en ébullition, et les vapeurs chasseront rapidement la majeure partie de l'air emprisonné.

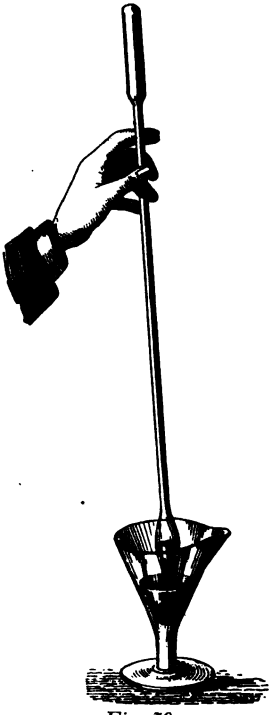


Fig. 79

Pour achever de le remplir, on devra répéter plusieurs fois l'opération dans les mêmes conditions, ou bien ce qui est préférable, on fera bouillir tout le mercure en plaçant le tube plein sur un fourneau à gaz recouvert d'une toile métallique ou sur une grille ordinaire à charbon. Après quelques instants d'ébullition, on peut être assuré que l'instrument sera complètement purgé d'air.

Laisser refroidir le tube sur le fourneau et retrancher l'ampoule lorsqu'il est à la température ambiante.

Réglage de la course. — Pour régler la course d'un thermomètre à mercure, on devra opérer de telle façon que la colonne de mercure s'arrête à la température moyenne qu'il doit indiquer. Pour arriver à ce résultat, on fera plonger le réservoir dans un bain d'eau salée en ébullition, et on devra l'y laisser jusqu'à ce qu'il ne sorte plus de mercure. Avant de le fermer, il est nécessaire de s'assurer que le zéro n'est ni trop

(1) Dans le cas où le mercure ne pénétrerait pas dans le réservoir inférieur, il faudrait chauffer ce dernier à nouveau, en tenant le tube dans une position inclinée. — Dans ces conditions, l'air se dilate et passe à travers le mercure de l'ampoule, et, par suite de son refroidissement, la pression extérieure fait descendre une certaine quantité de mercure dans le réservoir inférieur.

Digitized by Google

haut ni trop bas. Pour connaître sa position, on devra plonger le réservoir de l'instrument dans la glace fondante.

Dans le cas où le point correspondant à la glace fondante serait trop haut, il suffit, pour le faire descendre, de plonger le réservoir dans un bain porté à une température un peu plus élevée, de façon à chasser une nouvelle quantité de mercure.

Dans le cas contraire, l'échelle de l'instrument ne pourrait être faite que par comparaison et ne pourrait pas servir de thermomètre étalon. Pour remédier à cet inconvénient, il faudra vider l'instrument, diminuer la capacité du réservoir et recommencer à nouveau l'opération du remplissage.

La course étant bien réglée, on effile l'extrémité du tube, puis on chauffe à nouveau le réservoir, de manière à remplir complètement la tige; à ce moment on retire l'instrument du bain et l'on fond l'extrémité de la partie effilée, lorsque le mercure commence à descendre dans la tige. Il ne reste plus qu'à façonner cette extrémité suivant l'usage auquel est destiné le thermomètre.

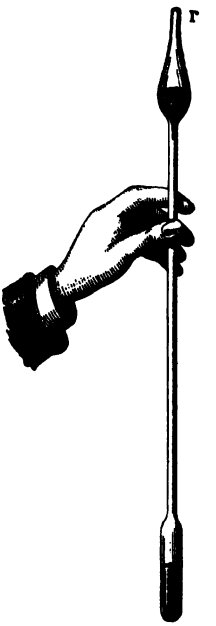


Fig. 80

Graduation. — Cette opération consiste, pour un thermomètre dont le tube est calibré, à diviser en cent parties équidistantes l'intervalle compris entre deux points dont les températures demeurent invariables dans les mêmes circonstances et sont faciles à reproduire. Ces deux points sont déterminés par la glace fondante et la vapeur d'eau en ébullition sous la pression 760. Le premier est 0°, le deuxième est 100°.

L'appareil qui sert ordinairement à déterminer le premier de ces points se compose d'un vase cylindrique à fond percé de trous de façon à ce que l'eau provenant de la fusion de la glace puisse s'écouler (*fig. 82*).

Mode opératoire

Plonger le thermomètre dans le vase décrit ci-dessus contenant de la glace pilée avec soin, veiller à ce que le réser-

Digitized by Google

voir et le mercure contenu dans le tube soient entièrement entourés de glace, attendre que le niveau de la colonne de mercure reste stationnaire, marquer ce point le plus délicatement possible avec une pointe trempée dans un vernis au bitume de Judée.

Détermination du point 100. — On a reconnu que la température de la vapeur d'eau demeure constante, quels que soient la nature du vase et l'état de pureté de l'eau employée pour produire cette vapeur, pourvu que la pression demeure elle-même constante; on a de plus constaté que cette température est égale, pour l'eau distillée, à celle de la couche la plus élevée de l'eau bouillante. On peut donc obtenir de la façon la plus rigoureuse le deuxième point fixe, que l'on est convenu d'appeler le point 100 ou le centième degré du thermomètre lorsque l'eau bout à la pression 760, en plongeant le thermomètre dans la vapeur, de façon à donner la température de l'eau bouillante à toute la colonne de mercure. Il faut se garder toutefois de plonger le réservoir du thermomètre dans l'eau bouillante parce que les couches du liquide, augmentant de température à mesure qu'elles sont plus profondes, le point que l'on veut déterminer deviendrait de plus en plus variable et s'élèverait sur la colonne à mesure qu'on enfoncerait le réservoir.

Fig. 81

Remarque. — Si la pression atmosphérique, au lieu d'être représentée par une colonne de mercure de

Digitized by Google

760 millimètres, était différente, on ferait une correction basée sur ce fait que la température d'ébullition de l'eau est retardée ou avancée de $\frac{1}{27}$ de degrés par millimètre de mercure en plus ou en moins de 760.

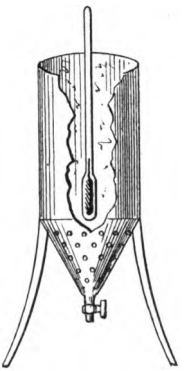


Fig. 82

Description de l'appareil. — On se sert, pour la détermination du point 100, d'un appareil composé d'une petite chaudière cylindrique *c c'* en laiton, fermée par un couvercle surmonté de deux tubes concentriques d'inégale longueur. Le tube intérieur se trouve en communication immédiat avec la vapeur que dégage l'eau en ébullition contenue dans la chaudière. Le tube extérieur V, fermé à sa partie supérieure, a pour objet d'empêcher le contact de l'air, et par suite le refroidissement de la vapeur. Celle-ci passe donc, au sortir de la chaudière, dans le tube extérieur enveloppant le premier, de manière à assurer la constance de la température et vient se répandre dans l'air par l'ouverture *a* ménagée dans la partie inférieure du second tube. A l'opposé de cette ouverture se trouve un manomètre M destiné à vérifier l'identité de la pression intérieure et extérieure (*fig. 83*).

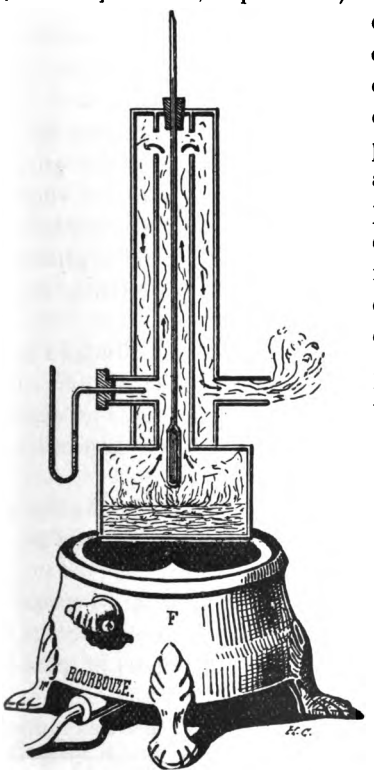


Fig. 83

Mode opératoire

Fixer le bouchon qui doit s'adapter exactement à une ouverture faite dans le couvercle qui ferme le tube extérieur; — descendre le thermomètre dans la vapeur d'eau jusqu'à ce que la colonne de mercure devienne stationnaire, ne dépassant le bouchon que de la quantité nécessaire à l'observateur

Digitized by Google

pour constater cette stabilité et déterminer ainsi le point 100 qu'il faut marquer de la même façon que le point zéro.

NOTA. — L'expérience a montré qu'il est préférable de déterminer le point zéro d'abord, puis tout de suite après le point 100.

DIVISION DE L'INSTRUMENT

L'intervalle compris entre les deux points donnés par la glace fondante et par l'eau en ébullition sous la pression 760 devra être divisé en cent parties égales, qu'on appelle degrés centigrades. Ces divisions devront être continuées au-dessus et au-dessous de ces points : leur ensemble forme l'échelle thermométrique.

Mode opératoire

Assujettir le thermomètre à diviser sur le chariot *cc'* de la machine à diviser. Ouvrir l'écrou d'entraînement. Faire glisser le chariot de manière à amener un des points fixes en coïncidence avec la pointe du traçoir. Noter la position de l'index *i* en regard de la règle fixée sur le bord du chariot; le faire glisser à nouveau de façon à ce que le deuxième point fixe vienne occuper la position du premier.

Le nombre de divisions qui auront passé devant l'index *i* fera connaître le nombre de tours de la vis V nécessaire au parcours de la distance qui sépare les points fixes entre lesquels les degrés doivent être gravés. En prenant le centième de ce nombre, on aura l'unité de la graduation.

Si, par exemple, on a noté qu'il a fallu déplacer le chariot de 175 millimètres pour passer du point zéro au point 100, l'unité de la graduation sera évidemment égale à 1 ‰ 75.

Pour régler et déterminer l'avancement du chariot pour cette unité, on devra amener à la 75e division de la roue à rochets R le cliquet fixé sur le montant de la butée de départ *m*, puis le solidariser après ce réglage à l'axe de la vis sans fin en serrant le collier *c* avec la vis V; enfin, après avoir placé l'un des points fixes du thermomètre en coïncidence avec le traçoir et fermé l'écrou d'entraînement du chariot, on amènera la butée de départ *m* sur le butoir *g*. L'autre butoir *h* devra être fixé sur la

Digitized by Google

coulisse B de telle façon qu'il s'oppose à la continuation du mouvement de la butée d'arrêt *n* lorsque la vis V aura fait avancer le chariot de l'unité de la graduation, c'est-à-dire après 1 tour plus 75 centièmes de tour.

CONSTRUCTION DU THERMOMÈTRE A ALCOOL

La dilatation de l'alcool ne suivant pas la même loi que celle du mercure, il faut, pour avoir un thermomètre sur les indications duquel on puisse compter, le graduer par comparaison avec un thermomètre étalon. On arrive à rendre le thermomètre comparable à ce dernier en plongeant les deux instruments dans le même bain et en déterminant des points de concordance de température aussi rapprochés que possible entre lesquels on trace les degrés intermédiaires indiqués par le thermomètre étalon. Si le thermomètre à alcool ainsi gradué est destiné à la mesure des températures basses, il est absolument indispensable de faire la même opération, mais en sens inverse, pour les températures inférieures à zéro.

La dilatation de l'alcool étant, dans les mêmes circonstances, environ sept fois plus grandes que celles du mercure, on devra prendre des tubes moins capillaires pour construire sans danger l'enveloppe thermométrique.

Pour construire un thermomètre à alcool, on choisit un tube plus ou moins capillaire, suivant l'usage auquel il est destiné; à l'une de ses extrémités on soude ou l'on souffle une boule ou un cylindre, on facilite beaucoup le remplissage en soudant un entonnoir cylindrique à l'extrémité opposée.

Si l'on veut construire un thermomètre à alcool, de précision, il est essentiel de n'employer que de l'alcool anhydre légèrement coloré avec de la

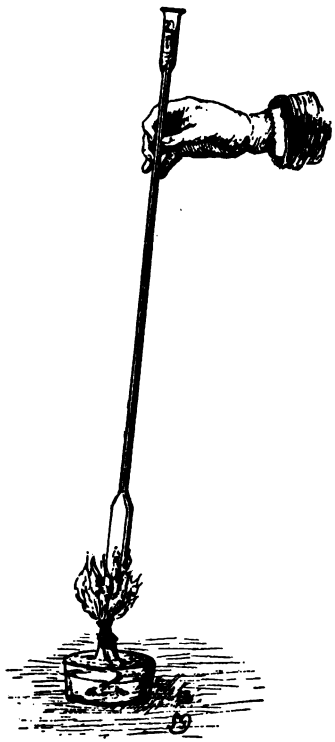


Fig. 48

Digitized by Google

teinture d'orseille et on aura le soin, en outre, de le diviser sur tige. On aura ainsi, non seulement un thermomètre dont les indications seront toujours comparables pour les mêmes températures, mais encore on évitera l'encrassement du tube, qui se produit toujours avec les autres matières colorantes.

Mode opératoire

Remplissage du tube. — Verser de l'alcool coloré dans le réservoir soudé à la partie supérieure du tube.

Chauffer légèrement le réservoir inférieur sur la flamme de la lampe à alcool (*fig. 84*) de façon à chasser une partie de l'air contenu dans l'instrument, le retirer de la flamme en le tenant dans une position verticale. L'air intérieur, en se refroidissant, diminue de force élastique et la pression atmosphérique fait passer une partie du liquide dans le réservoir inférieur.

Fig. 85

Faire bouillir l'alcool. Les vapeurs se condensent et l'appareil ne tarde pas à se remplir complètement.

Pour faire sortir la petite bulle d'air qui reste toujours à la naissance du tube après cette opération, il suffit de le faire tourner rapidement comme une fronde à l'aide d'une ficelle enroulée sur toute la longueur du tube par une série de nœuds coulants (*fig. 85*).

L'instrument complètement plein à la température ambiante, on sépare le réservoir supérieur par un trait de lime.

Pour régler la course maximum du thermomètre, on plonge le réservoir dans un bain d'eau ayant cette température maximum. Une fois l'excédent du liquide sorti, on le laisse se refroidir, et lorsqu'il est revenu à la température ambiante, on effile l'extrémité du tube, que l'on scelle au chalumeau.

Digitized by Google

GRADUATION DU THERMOMÈTRE A ALCOOL

Détermination des points fixes. — La détermination du point fixe zéro se fait comme pour le thermomètre à mercure, en plongeant l'instrument dans la glace fondante. Les autres points s'obtiennent par comparaison avec le thermomètre étalon.

L'appareil qui sert à déterminer les points fixes compris entre les points extrêmes se compose d'une chaudière en métal, assez haute pour que la colonne liquide de l'instrument plonge entièrement dans l'eau contenue dans cette chaudière.

Mode opératoire

Plonger le thermomètre étalon ainsi que le thermomètre à graduer dans l'eau.

Chauffer de manière à élever et à maintenir à + 15° la température de l'eau, marquer le niveau de la colonne liquide sur la tige du thermomètre à graduer par un point aussi fin que possible. — Élever graduellement la température du bain, de manière à déterminer de 15 en 15° des points de concordance, en ayant soin de maintenir la température constante pendant quelque temps à chacun de ces points. — Diviser ensuite les intervalles en autant de degrés qu'en marque le thermomètre étalon. On sera assuré que ces points intermédiaires ont été bien déterminés si l'on obtient la même concordance par le refroidissement du bain.

GRADUATION DES THERMOMÈTRES

A ÉCHELLES FRACTIONNÉES

Pour les thermomètres destinés aux recherches ou aux observations qui exigent des instruments de très grande sensibilité, il convient que leur réservoir ne contienne que peu de mercure et que les tubes soient assez fins pour que chaque degré occupe

Digitized by Google

une grande longueur dans le tube : ils auront, dans ces conditions, le double avantage d'indiquer de légères variations de température et de les indiquer rapidement (1).

On pourra toujours régler la sensibilité de l'instrument en donnant un volume plus ou moins grand au réservoir. La course du mercure devra être réglée suivant l'usage auquel on destine l'instrument.

Lorsqu'on a construit des instruments de ce genre, on ne fait comprendre à l'échelle de chacun d'eux qu'un petit nombre de degrés afin d'éviter une trop grande longueur de tige. On devra donc, pour les recherches spéciales, avoir plusieurs thermomètres dont chacun conviendra de telle à telle limite et dont l'ensemble remplacera un seul à longue tige.

La graduation se fait par comparaison et la division s'effectue comme il a été dit pour le thermomètre à alcool (2).

THERMOMÈTRES MÉTASTATIQUES (WALFERDIN)

On appelle ainsi des thermomètres dans lesquels le degré peut occuper une longue course et qu'on peut disposer à son gré suivant la mesure des températures que l'on a à effectuer, de façon que dans chaque cas particulier le thermomètre remplace un thermomètre à échelle fractionnée.

A la partie supérieure d'un thermomètre à réservoir très petit et à tige très fine on a ménagé une ampoule *a* (*fig.* 86) reliée au tube par une partie rétrécie *r*.

---

(1) Nous avons dit que pour déterminer exactement les points fixes d'un thermomètre étalon il fallait : 1° que le réservoir et le mercure fussent entourés de glace au moment où le niveau du liquide reste stationnaire; — 2° que cette même colonne de mercure devait plonger dans la vapeur d'eau à 100° et que son niveau devait dépasser le bouchon de la quantité nécessaire pour marquer ce deuxième point fixe. Il résulte de ce qui précède que la température d'un bain liquide ne pourra s'effectuer d'une façon absolue si le réservoir plonge seul dans le liquide. Il faut donc se mettre dans les mêmes conditions que nous venons d'indiquer pour la détermination des points fixes pour avoir d'une façon rigoureuse la température d'un bain.

(2) On a observé que le zéro des thermomètres se déplace soit avec le temps, soit par des changements brusques de température. Il est donc urgent de vérifier le point fixe zéro du thermomètre étalon avant de s'en servir pour la graduation des thermomètres à échelles fractionnées

Digitized by Google

Supposons qu'on ait en vue d'évaluer avec précision une température comprise entre 50 et 55°. On commence par chauffer le thermomètre dans un bain à 55°. Le mercure en excès se loge dans l'ampoule. Lorsqu'on a atteint la température de 55°, on retire le tube du bain, et au moment où le refroidissement commence, on lui donne une secousse brusque qui sépare le mercure de la tige de celui de l'ampoule. On laisse alors refroidir et le thermomètre est prêt pour l'observation.

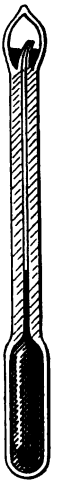


Fig. 86

En général, la tige est divisée en deux cents parties d'égale capacité et la course du mercure dans la tige correspond à une augmentation de température de 10°. On peut donc apprécier le $\frac{1}{20}$ de degré. L'œil peut même évaluer le quart ou le $\frac{1}{5}$ de chaque division, ce qui donne le $\frac{1}{80}$ ou le $\frac{1}{100}$ de degré.

Nous verrons plus loin la mesure des températures au moyen du thermomètre à poids.

ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES

On ne prend pas partout les mêmes points fixes. Le thermomètre de Fahrenheit dont on se sert en Angleterre, a pour point fixe inférieur le degré de congélation donné par un mélange de sel ammoniac et de glace, et pour point fixe supérieur le degré de l'eau bouillante sous la pression 760. Dans ce thermomètre, l'intervalle entre les deux points fixes est divisé en deux cent douze parties; le zéro de notre thermomètre centigrade coïncide avec la 32e division de celui-ci. On a donc 212° moins 32°, ce qui donne 180° pour l'échelle de ce thermomètre ramené aux points fixes du thermomètre centigrade; donc 180° Fahrenheit égalent 100° centigrades, et par suite 9° Fahrenheit égalent 5° centigrades. Pour convertir les degrés Fahrenheit en degrés centigrades, il faut retrancher 32° du nombre de degrés Fahrenheit et multiplier le reste par $\frac{5}{9}$.

Si l'on a, par exemple, à convertir 58° Fahrenheit en degrés

Digitized by Google

centigrades, on retranche 32 de 58 et l'on multiplie le reste 26 par $\frac{5}{9}$.

On aura donc ainsi : $58 - 32 = 26$,

$$26 \times \frac{5}{9} = 14°,44.$$

Réciproquement pour transformer une température centigrade en degrés Fahrenheit, il faut la multiplier par $\frac{9}{5}$ et ajouer 32.

Par exemple, si l'on a à convertir 20° centigrades en degrés Fahrenheit, on devra multiplier 20 par $\frac{9}{5}$ et ajouter 32.

On aura ainsi : $20 \times \frac{9}{5} = 36$.

$$36 + 32 = 68° \text{ Fahrenheit}$$

68° sera donc la température cherchée.

Il peut arriver que le nombre de degrés Fahrenheit à convertir en degrés centigrades soit plus petit que 32. Il suffit dans ce cas de retrancher de ce nombre le degré observé pour avoir les degrés au-dessous du point 32, puis de multiplier comme précédemment par $\frac{5}{9}$.

Si l'on a, par exemple, 15° Fahrenheit à convertir en degrés centigrades, on devra, par ce qui précède, retrancher 14 de 32 et multiplier le reste par $\frac{5}{9}$.

$32 - 14 = 18$,

$18 \times \frac{5}{9} =$ 10° centigrades *au-dessous de zéro*.

Le thermomètre de Réaumur n'est plus guère en usage maintenant que pour les thermomètres dits d'appartements. L'échelle de ce thermomètre ne diffère de l'échelle centigrade que par le nombre de divisions intercalées entre le premier point fixe, qui représente aussi la température de la glace fondante, et le deuxième qui marque 80° au point d'ébullition de l'eau à la pression 760.

Pour convertir une indication Réaumur en degrés centigrades, il faut la multiplier par $\frac{5}{4}$; réciproquement pour convertir une température centigrade en Réaumur, il faut la multiplier par $\frac{4}{5}$.

Digitized by Google

COMPARAISON

des thermomètres Fahrenheit et centigrade

FAHRENHEIT	CENTIGRADE	FAHRENHEIT	CENTIGRADE	FAHRENHEIT	CENTIGRADE
0	— 17,78	36	2,22	72	22,22
1	— 17,22	37	2,78	73	22,78
2	— 16,67	38	3,33	74	23,33
3	— 16,11	39	3,89	75	23,89
4	— 15,56	40	4,44	76	24,44
5	— 15,00	41	5,00	77	25,00
6	— 14,44	42	5,56	78	25,56
7	— 13,89	43	6,11	79	26,11
8	— 13,33	44	6,67	80	26,67
9	— 12,78	45	7,22	81	27,22
10	— 12,22	46	7,78	82	27,78
11	— 11,67	47	8,33	83	28,33
12	— 11,11	48	8,89	84	28,89
13	— 10,56	49	9,44	85	29,44
14	— 10,00	50	10,00	86	30,00
15	— 9,44	51	10,56	87	30,56
16	— 8,89	52	11,11	88	31,11
17	— 8,33	53	11,67	89	31,67
18	— 7,78	54	12,22	90	32,22
19	— 7,22	55	12,78	91	32,78
20	— 6,67	56	13,33	92	33,33
21	— 6,11	57	13,89	93	33,89
22	— 5,56	58	14,44	94	34,44
23	— 5,00	59	15,00	95	35,00
24	— 4,44	60	15,56	96	35,56
25	— 3,89	61	16,11	97	36,11
26	— 3,33	62	16,67	98	36,67
27	— 2,78	63	17,22	99	37,22
28	— 2,22	64	17,78	100	37,78
29	— 1,67	65	18,33	101	38,33
30	— 1,11	66	18,89	102	38,89
31	— 0,56	67	19,44	103	39,44
32	0,00	68	20,00	104	40,00
33	+ 0,56	69	20,56	105	40,56
34	1,11	70	21,11	106	41,11
35	1,67	71	21,67		

Digitized by Google

COMPARAISON

des thermomètres Réaumur et centigrade.

RÉAUMUR	CENTIGRADE	RÉAUMUR	CENTIGRADE	CENTIGRADE	RÉAUMUR	CENTIGRADE	RÉAUMUR
0	0	35	43,75	0	0	35	28,0
1	1,25	36	45,00	1	0,8	36	28,8
2	2,50	37	46,25	2	1,6	37	29,6
3	3,75	38	47,50	3	2,4	38	30,4
4	5,00	39	48,75	4	3,2	39	31,2
5	6,25	40	50,00	5	4,0	40	32,0
6	7,50	41	51,25	6	4,8	41	32,8
7	8,75	42	52,50	7	5,6	42	33,6
8	10,00	43	53,75	8	6,4	43	34,4
9	11,25	44	55,00	9	7,2	44	35,2
10	12,50	45	56,25	10	8,0	45	36,0
11	13,75	46	57,50	11	8,8	46	36,8
12	15,00	47	58,75	12	9,6	47	37,6
13	16,25	48	60,00	13	10,4	48	38,4
14	17,50	49	61,25	14	11,2	49	39,2
15	18,75	50	62,50	15	12,0	50	40,0
16	20,00	51	63,75	16	12,8	51	40,8
17	21,25	52	65,00	17	13,6	52	41,6
18	22,50	53	65,25	18	14,4	53	42,4
19	23,75	54	67,50	19	15,2	54	43,2
20	25,00	55	68,75	20	16,0	55	44,0
21	26,25	56	70,00	21	16,8	56	44,8
22	27,50	57	71,25	22	17,6	57	45,6
23	28,75	58	72,50	23	18,4	58	46,4
24	30,00	59	73,75	24	19,2	59	47,2
25	31,25	60	75,00	25	20,0	60	48,0
26	32,50	62	77,50	26	20,8	61	48,8
27	33,75	64	80,00	27	21,6	62	49,6
28	35,00	66	82,50	28	22,4	63	50,4
29	36,25	68	85,00	29	23,2	64	51,2
30	37,50	70	87,50	30	24,0	65	52,0
31	38,75	72	90,00	31	24,8	70	56,0
32	40,00	74	92,50	32	25,6	75	60,0
33	41,25	76	95,00	33	26,4	80	64,0
34	42,50	78	97,50	34	27,2	90	72,0
35	43,75	80	100,00	35	28,0	100	80,0

Digitized by Google

COMPARAISON DES THERMOMÈTRES

On peut se proposer de comparer à un thermomètre étalon, un autre thermomètre dont la tige a été graduée arbitrairement en parties d'égale longueur.

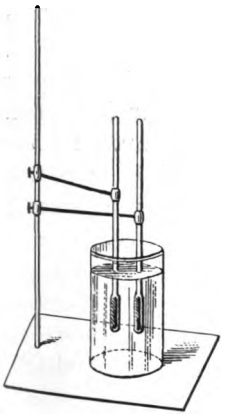


Fig. 87

On place les deux thermomètres à côté l'un de l'autre dans un vase contenant de la glace fondante. On note les indications des deux thermomètres.

On remplace ensuite la glace fondante par de l'eau froide dont on peut faire varier la température en ajoutant à plusieurs reprises de l'eau chaude (*fig. 87*).

On note pour chaque température de l'eau les indications des deux thermomètres. Quand on a ainsi un tableau comprenant une série de comparaisons, on construit une courbe.

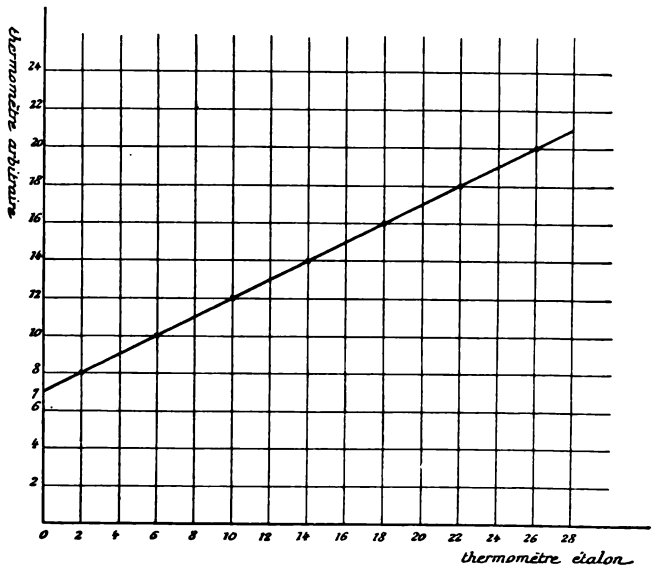


Fig. 88

Digitized by Google

Pour cela, on porte sur un axe horizontal des divisions d'égale longueur, représentant les indications du thermomètre étalon; sur un axe vertical, on porte de même des divisions d'égale longueur, représentant les indications du thermomètre à échelle arbitraire.

Supposons que dans la glace fondante le thermomètre étalon marquant 0°, le thermomètre arbitraire marque 7°. Cette observation nous fournira un point A correspondant à la division zéro sur l'axe horizontal, et à la division 7 de l'axe vertical. Une observation faite à 10° nous donnera la division 12 pour l'échelle arbitraire, et par suite le point B et ainsi de suite. En joignant les points obtenus par un trait continu, on a une courbe, qui aux erreurs d'observations près, doit se réduire à une droite et qui permettra de trouver la température T correspondant à une division N de l'échelle arbitraire.

Digitized by Google

DILATATIONS

GÉNÉRALITÉS

Soit V_0 le volume d'un corps à la température de la glace fondante. Portons ce corps à une température t. En général, son volume a augmenté et est devenu V_t ; $V_t - V_0$ mesure la *dilatation* du corps en passant de 0° à t°.

$\frac{V_t - V_0}{t}$ est la ***dilatation moyenne*** de 0° à t°.

Enfin, $\frac{V_t - V_0}{V_0 t}$ qui est la dilatation moyenne de l'unité de volume sera désigné par coefficient moyen de dilatation du corps considéré entre 0° et t°.

On appelle coefficient de dilatation moyen entre t° et t'° le rapport $\frac{V_{t'} - V_t}{V_t(t' - t)}$.

On appelle coefficient vrai de dilatation à la température t°, la limite vers laquelle tend ce rapport quand la température t' se rapproche indéfiniment de la température t.

Le coefficient de dilatation ainsi défini, relatif au volume, se nomme coefficient de dilatation cubique lorsqu'il s'agit d'un corps solide. Désignons le par K. On définirait exactement de même le coefficient de dilatation linéaire α et le coefficient de dilatation superficiel σ. Un raisonnement très simple montre que l'on a très sensiblement

$$K = 3\alpha \text{ et } \sigma = 2\alpha.$$

Pour les liquides, on définira de même deux coefficients de dilatation :

Digitized by Google

1° Le coefficient de dilatation absolue, indépendant du vase qui renferme le liquide, soit Δ ;

2° Le coefficient de dilatation apparente, dépendant de la dilatation du vase, soit δ.

On a entre Δ, δ et le coefficient de dilatation cubique K de l'enveloppe, la relation simple

$$\Delta = \delta + K.$$

Pour les gaz, il y a également lieu de définir deux coefficients de dilatation :

1° A pression constante ;

2° A volume constant. Ce dernier est plutôt, à proprement parler, un confluent d'augmentation de pression.

Nous n'insisterons pas davantage sur ces généralités dont le détail est suffisamment exposé dans tous les ouvrages de Physique.

Digitized by Google

TABLEAU DES DILATATIONS LINÉAIRES

SUBSTANCES	COEFFICIENT depuis la glace fondante jusqu'à 100°	
	Fractions ordinaires	Fractions décimales
Glace de Saint-Gobain	$\frac{1}{1122}$	0,0008912
Verre blanc (tubes de baromètre)	$\frac{1}{1175}$	0,00083333
Tube de verre sans plomb	$\frac{1}{1142}$	0,0008756
Cuivre rouge	$\frac{1}{584}$	0,0017123
Cuivre jaune (laiton)	$\frac{1}{529}$	0,0018903
Fer doux forgé	$\frac{1}{819}$	0,0012210
Fer rond, passé à la filière	$\frac{1}{812}$	0,0012315
Acier non trempé	$\frac{1}{927}$	0,0010787
Plomb	$\frac{1}{351}$	0,0028490
Etain des Indes	$\frac{1}{516}$	0,0019364
Argent de coupelle	$\frac{1}{524}$	0,0019084
Argent au titre de Paris	$\frac{1}{524}$	0,0019084
Or de départ	$\frac{1}{682}$	0,0014661
Or, au titre de Paris, non recuit	$\frac{1}{645}$	0,0015504
— recuit	$\frac{1}{661}$	0,0015128
Platine (selon Borda)	$\frac{1}{1167}$	0,0008569
Zinc (d'après Smeaton)	$\frac{1}{340}$	0,002942
Palladium (d'après Wollaston)	$\frac{1}{1000}$	0,001000

Digitized by Google

DILATATIONS DES LIQUIDES

MÉTHODE DU THERMOMÈTRE A POIDS (*fig. 89*)

Le thermomètre à poids se compose d'un cylindre de verre surmonté d'un tube fin recourbé deux fois à angle droit et terminé par une pointe capillaire.

Mode opératoire

On pèse l'instrument vide, soit P son poids.

Fig. 89

On le remplit de mercure comme un thermomètre ordinaire, et on le porte dans la glace fondante, la pointe plongeant dans une capsule contenant du mercure, de façon que l'appareil soit complètement rempli de mercure à la température de 0°.

On porte le thermomètre dans une étuve à 100°. Le mercure sort du tube. On le recueille et on le pèse. Soit π le poids du mercure sorti.

On pèse de nouveau l'appareil lorsqu'il est refroidi, soit P′ son poids.

Le poids du mercure qui remplit l'appareil à 0° est donc $P' + \pi - P$.

Appelons m le coefficient de dilatation du mercure.

K — — du verre.

D_0 la densité du mercure à 0°.

Le volume du mercure à 0° est $\frac{P' + \pi - P}{D_0}$.

Le volume du thermomètre à 0° est donc aussi $\frac{P' + \pi - P}{D_0}$.

A 100°, ce volume est devenu $\frac{P' + \pi - P}{D_0}(1 + K \times 100)$.

Digitized by Google

A cette température, le réservoir contient un poids P′ — P de mercure dont le volume est devenu $\frac{P' - P}{D_0}(1 + m \times 100)$.

On a donc :

$$\frac{P' - P}{D_0}(1 + m \times 100) = \frac{P' + \pi - P}{D_0}(1 + K \times 100),$$

égalité que fait connaître K si on donne à m la valeur $\frac{1}{5550}$ déterminée par Regnault. Connaissant m et K, on refera les mêmes expériences à une température inconnue T, ce qui donnera

$$\frac{P'_1 - P}{D_0}(1 + m\,T) = \frac{P'_1 + \pi_1 - P}{D_0}(1 + KT),$$

d'où T.

Enfin, on peut recommencer la même série d'expériences, en opérant à une température connue T, mais avec un liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue, x étant ce coefficient, on aura :

$$\frac{P'_2 - P}{d_0}(1 + x\,T) = \frac{P'_2 + \pi_2 - P}{d_0}(1 + KT).$$

Remarque. — On voit que d_0 est facteur dans les deux nombres et peut être supprimé.

PROCÉDÉ DU THERMOMÈTRE A TIGE

1re *Opération.* — Pour employer la méthode du thermomètre à tige, on procède comme pour un thermomètre à échelle arbitraire. On divise la tige en parties d'égale longueur. On introduit dans cette tige ainsi graduée une petite colonne de mercure que l'on déplace dans les différentes parties de la graduation. On déterminera ainsi les longueurs correspondantes à des capacités égales. On remplit le tube de mercure de façon à ce que, dans la glace fondante, le mercure arrive vers le bas de la tige à une division n_1. On a, au préalable, déterminé par double pesée le poids π de l'enveloppe vide. On pèse l'enveloppe et le mercure jusqu'à la division n_1 soit $\pi + p$, le poids trouvé. On ajoute du mercure jusqu'à ce que celui-ci arrive à une division n_2 située à la partie supérieure de la tige.

Digitized by Google

Nous supposons qu'on ait divisé cet intervalle $n_1 - n_2$ en n parties d'égale capacité.

Soit $\pi + p'$ le poids de l'appareil et du mercure en n_2.

$p' - p$ est le poids du mercure qui remplit n divisions de la tige.

Appelons N le volume du réservoir jusqu'à la division n_1, volume exprimé en divisions de la tige (d'égale capacité). On a :

$$\frac{n}{N} = \frac{p' - p}{p}, \text{ d'où N connaissant } n.$$

2e *Opération*. — L'appareil contenant du mercure jusqu'à la division n_1, à 0°, le porter à la température de 100°. Noter la divion n_2 à laquelle il s'arrête. Soit n' le nombre de divisions (d'égale capacité) compris entre n_1 et n_2.

La dilatation apparente du mercure dans le thermomètre sera :

$$\delta = \frac{n'}{N \times 100}.$$

3e *Opération*. — Calculer le coefficient de l'enveloppe par la formule

$$K = \frac{1}{5550} - \delta.$$

4e *Opération*. — Remplir le thermomètre avec le liquide à étudier. Déterminer de même la dilatation apparente à des températures $t_1\ t_2\ t_3$, etc. En ajoutant la dilatation du verre, on aura les dilatations absolues correspondant à ces températures. On construira ensuite une courbe en portant en abscisses les températures et en ordonnées les dilatations.

MÉTHODE DES DENSITÉS

On appliquera la méthode du flacon précédemment décrite, en déterminant les densités du liquide à 0° et à une température quelconque t. On a alors

$$D_o = D_t\ (1 + \Delta t),$$

d'où Δ, coefficient moyen entre zéro et t.

Digitized by Google

ÉTUDE DU MAXIMUM DE DENSITÉ DE L'EAU

Appareil de Hope — Courbes de Despretz

L'appareil de Hope (*fig. 90*) se compose simplement d'une éprouvette à pied dans laquelle pénètrent deux (ou quatre) thermomètres très sensibles, T et T, donnant le $\frac{1}{10}$ de degré. On entoure l'éprouvette de glace fondante que l'on met dans un manchon D et on suit la marche des deux thermomètres de minute en minute.

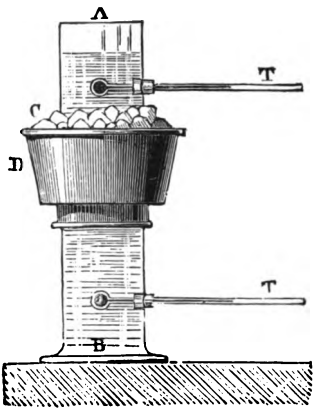


Fig. 90

On trace alors pour chaque thermomètre une courbe, en portant sur l'axe horizontal les temps, sur l'axe vertical les températures.

On obtient ainsi deux courbes ayant l'allure de celles indiquées par la figure 91.

Ces deux courbes se coupent en un point M.

La température *t* correspondant à ce point M, donne la température du maximum de densité de l'eau.

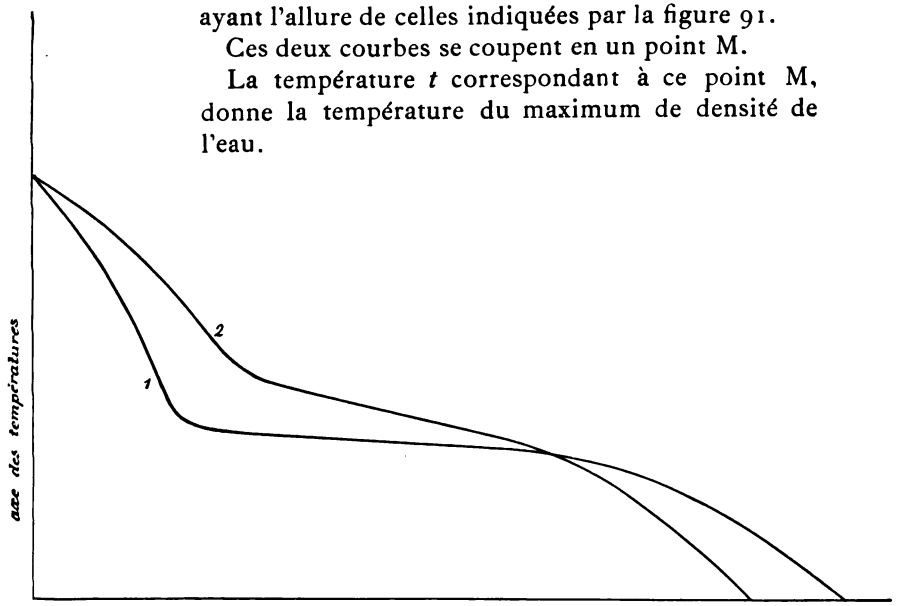


Fig. 91

Digitized by Google

CALORIMÉTRIE

Le but de la *calorimétrie* est de mesurer les quantités de chaleur absorbées ou dégagées dans un phénomène thermique quelconque, physique ou chimique. Avant d'aborder l'étude des méthodes calorimétriques, nous donnerons quelques définitions indispensables.

L'unité de quantité de chaleur adoptée est la *calorie*. C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° la température de 1 kilogramme d'eau.

Pratiquement, on se sert d'une unité mille fois plus petite. C'est la *petite calorie*, quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° la température de 1 gramme d'eau.

On appelle *chaleur spécifique* d'un corps la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° la température de 1 gramme de ce corps. Pratiquement et dans les limites de température des expériences de laboratoire, cette chaleur spécifique est la même de $t°$ à $t+1$ que de 0° à 1°. Plus exactement, cette chaleur spécifique varie avec la température.

On appelle *chaleur spécifique moyenne* de $t°$ à $t'°$ le quotient $\frac{Q_t^{t'}}{t'-t}$, $Q_t^{t'}$ représentant la quantité de chaleur nécessaire pour élever de $t°$ à $t'°$ la température de 1 gramme du corps considéré.

On appelle *chaleur spécifique vraie* à $t°$ la limite de ce quotient quand les températures t' et t sont infiniment voisines.

L'eau à l'état liquide ayant la plus grande chaleur spécifique, c'est cette chaleur spécifique que l'on a prise comme unité.

On appelle souvent *capacité calorifique* d'un corps ou encore *valeur en eau* de ce corps le produit $P \times c$ du poids de ce corps par sa chaleur spécifique.

Digitized by Google

MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES

PAR LE CALORIMÈTRE DE BUNSEN

Le calorimètre Bunsen se compose d'un réservoir de verre R entourant un tube de verre mince A. Ce réservoir R se continue par un tube plus étroit S, dans lequel vient s'engager à la partie supérieure un tube capillaire recourbé horizontalement et dont la tige est divisée en parties d'égales longueurs.

La partie supérieure du réservoir R contient de l'eau complètement privée d'air par ébullition. Au-dessous se trouve du mercure qui remplit le tube S et arrive en I dans le tube capillaire.

Mode opératoire

On commence par faire congeler l'eau du réservoir R autour du tube A. C'est là une des parties délicates de cette manipulation. Il faut avoir soin que la congélation ne soit pas trop brusque, ce qui entraînerait la rupture de l'appareil. Il n'est d'ailleurs pas nécessaire que toute l'eau soit à l'état de glace. Il suffit qu'il se soit formé autour de A un manchon de glace composé de couches successives. Pour y arriver, on fait circuler dans le tube A un courant d'alcool refroidi par un mélange réfrigérant. Quand la couche de glace a commencé à se former, on enlève l'alcool, que l'on remplace par de l'eau à 0°. On place tout l'appareil jusqu'à la douille D dans de la glace fondante. Quand tout l'appareil a bien pris la température zéro, il est prêt à fonctionner. On chauffe à une température comme T le corps dont on veut déterminer la chaleur spécifique. En se refroidissant jusqu'à zéro, le corps cède au calorimètre une quantité de chaleur $Px\mathrm{T}$, x étant la chaleur spécifique cherchée, P le poids du

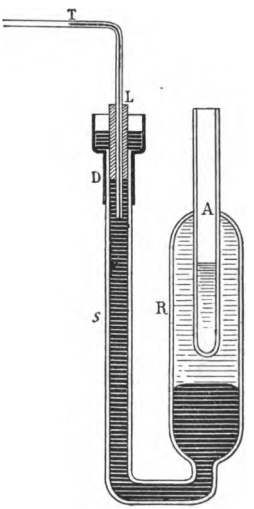


Fig. 92

Digitized by Google

corps. Cette quantité de chaleur fait fondre une partie de la glace. Il en résulte une diminution de volume qui se traduit par une rétrogradation du mercure dans le tube capillaire. Soit n le nombre de divisions parcourues par le mercure. On a :

$$P \times x \times T = K \times n,$$

K étant une constante de l'appareil.

Pour déterminer K, on recommence l'expérience en versant dans le tube A un poids connu π d'eau chauffée à une température connue t. On a

$$\pi \times t = Kn'$$

n' étant le nombre de divisions correspondantes, on a donc

$$\frac{P\,x\,T'}{\pi\,t} = \frac{n}{n'}, \text{ d'où } x.$$

Remarque. En enfonçant plus ou moins le tube capillaire, on pourra amener le mercure à telle position qu'on jugera convenable pour la mesure à effectuer.

CHALEURS SPÉCIFIQUES

des corps solides ou liquides par la méthode des mélanges

L'appareil qui sert ordinairement dans les laboratoires pour déterminer les chaleurs spécifiques des corps solides ou liquides par la méthode des mélanges se compose d'un vase C en laiton très mince et parfaitement poli (*fig. 93*).

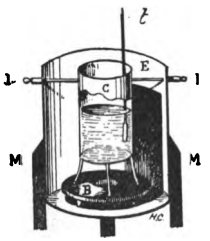


Fig. 93

Pour éviter les pertes de chaleur par les supports et par le contact de l'air ambiant, ce vase ou calorimètre repose sur un trépied en bois placé sur le fond de l'enveloppe E qui est supportée par trois branches à biseau fixées sur le socle en bois S (*fig. 94*). Enfin de petites tiges non conductrices de la chaleur le maintiennent concentriquement à l'enveloppe E.

Un thermomètre à mercure très sensible t, divisé en cin-

Digitized by Google

quièmes de degré est maintenu dans l'eau du calorimètre par le support S'.

Pour amener le corps à une température connue, on le fixe à l'une des extrémités d'un fil de soie et on le maintient au centre de l'étuve à air B, en fixant l'autre extrémité au couvercle de cette étuve. Cette dernière est fixée par trois pieds soudés au fond de la chaudière contenant de l'eau, que l'on fait bouillir sur un fourneau F. Le couvercle, muni d'un manche en bois M (*fig. 95*), porte une tubulure dans laquelle est ajusté un thermomètre à mercure T.

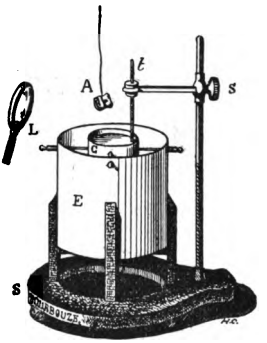


Fig. 94

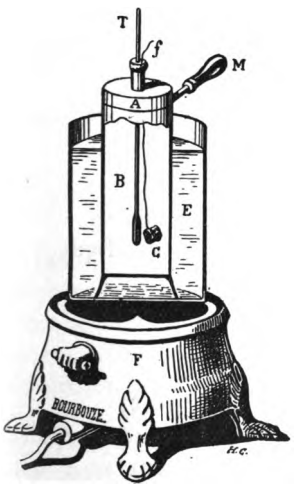


Fig. 95

Quand le corps dont on veut trouver la chaleur spécifique est en fragments ou liquide, on devra, dans le premier cas, l'introduire dans un petit panier en toile métallique construit de façon à pouvoir y introduire le réservoir du thermomètre. Dans le deuxième cas, le corps sera placé dans de petits réservoirs de métal très mince; au lieu de suspendre le corps C au fil de soie *f*, on suspend le petit panier qui contient le corps en fragments ou le petit réservoir de métal qui contient le corps liquide (*fig. 96*).

Mode opératoire

Prendre le poids P du corps dont on veut connaître la chaleur spécifique. Le placer comme il a été dit, dans l'étuve à air. Maintenir l'eau de la chaudière en ébullition jusqu'à ce que le thermomètre indique une température stationnaire pendant un certain temps.

Digitized by Google

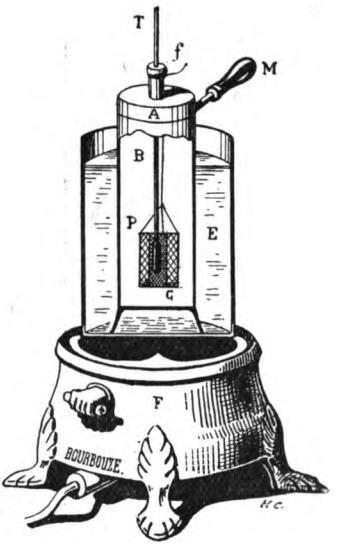


Fig 96

Verser dans le calorimètre, après l'avoir pesée, la quantité d'eau nécessaire pour que le corps soit complètement immergé. Peser cette eau. Mettre le calorimètre sur son support S. Placer le thermomètre dans l'eau du calorimètre. Noter sa température à l'aide de la loupe L. Retirer le corps de l'étuve en le maintenant par l'extrémité du fil. Le porter et le plonger aussi rapidement que possible dans l'eau du calorimètre. Observer la température maxima θ à laquelle arrive le mélange.

Soient :

M poids de l'eau contenu dans le calorimètre.
t température initiale de l'eau.
T température du corps chauffé dans l'étuve à air.
P poids du corps dont on cherche la chaleur spécifique.
θ température finale du mélange.
p poids du calorimètre.
c chaleur spécifique du laiton (0,094).
x chaleur spécifique cherchée.

Le corps perd une quantité de chaleur $P\,x\,(T - \theta)$

L'eau a gagné, après cette opération, une quantité de chaleur égale à celle perdue par le corps; l'échauffement sera donc $M\,(\theta - t)$.

On aura donc : $P\,x\,(T - \theta) = M\,(\theta - t)$,

d'où l'on tire : $x = \dfrac{M\,(\theta - t)}{P\,(T - \theta)}$.

La quantité de chaleur que le calorimètre a absorbé pour s'élever de t à θ est $p\,c\,(\theta - t)$. Elle devra être ajoutée au second membre de l'équation.

On a donc : $P\,x\,(T - \theta) = (M + p\,c)\,(\theta - t)$,

d'où $$x = \frac{(M + p\,c)\,(\theta - t)}{P\,(T - \theta)}.$$

Digitized by Google

Exemple. — Soient :

P poids du corps dont on cherche la chaleur spécifique. . . . . = 61,8.
p poids du calorimètre . . . . . = 32,65.
M poids de l'eau contenue dans le calorimètre. . . = 160.
t température initiale de l'eau. . . . . = 22°2.
T température du corps chauffé dans l'étuve à air . = 98°.
θ température finale du mélange. . . . . = 23°8.
c chaleur spécifique du laiton . . . . . = 0,094.
x chaleur spécifique cherchée.

En remplaçant par leur valeur les lettres de la formule :

$$x = \frac{(M + pc)(\theta - t)}{P(T - \theta)}.$$

on aura : $x = \frac{[160 + (32{,}65 \times 0{,}094)] \times (23°8 - 22°2)}{61{,}8\ (98° - 23°8)}$.

d'où : $x = \frac{269{,}910560}{4585{,}56} = 0{,}0568.$

La chaleur spécifique déterminée ci-dessus est celle de l'étain pur.

Chaleur spécifique d'un corps en fragments

Quand un corps dont on veut connaître la chaleur spécifique est en petits fragments, il faut faire usage d'un panier métallique dont on devra connaître le poids et la chaleur spécifique afin de pouvoir tenir compte de la quantité de chaleur qu'il cède à l'eau; on ajoute cette quantité à celle abandonnée par le corps soumis à l'expérience.

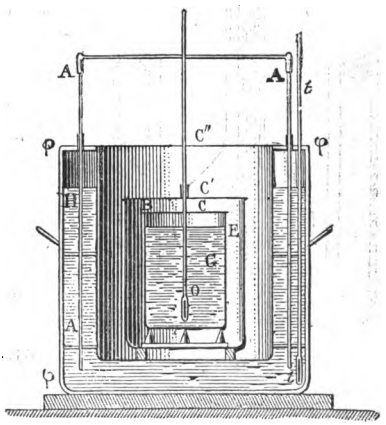


Fig. 97

Corrections calorimétriques

Pour des déterminations plus précises et afin d'éviter les pertes de chaleur par rayonnement, on se servira du calorimètre de M. Berthelot (*fig. 97*).

Digitized by Google

Si l'expérience ne dépasse pas quelques minutes et que les excès de température du calorimètre sur l'enceinte ne s'élève pas au-dessus de 2°, les corrections sont inutiles.

Dans le cas où ces corrections sont nécessaires, dès que le mélange est fait, on note, de minute en minute, les températures $\tau\ \tau'\ \tau''$ depuis la température initiale t jusqu'à la température finale θ, les abaissements moyens de température sont d'après la loi de refroidissement de Newton :

$$a\left(\frac{\tau+\tau'}{2}-t\right) \qquad a\left(\frac{\tau'+\tau''}{2}-t\right), \text{ etc.}$$

soit s la somme de ces quantités; la température finale sera $\theta + s$. Pour déterminer a, on observe les températures τ et τ' pendant l'intervalle d'une minute. On a :

$$a = \frac{\tau-\tau'}{\frac{\tau+\tau'}{2}-t}.$$

Chaleur de combinaison

On introduit dans des fioles, à la température t du laboratoire, des poids convenables des liquides (1). On verse dans le calorimètre le contenu de l'une de ces fioles en la tenant avec une pince de bois, on y place un thermomètre et on agite. Pendant que le thermomètre se met en équilibre, on place la deuxième fiole dans une enceinte métallique située à côté de la grande et à portée de l'opérateur. Après s'être assuré que les liquides sont à la même température, on verse rapidement le contenu de la deuxième fiole dans la première, et on observe la température maximum θ.

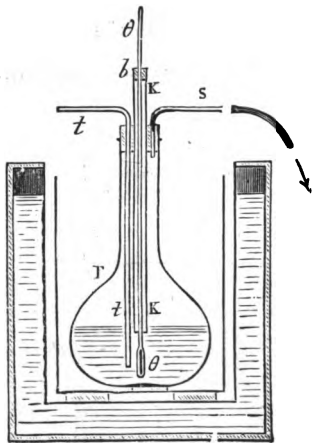


Fig. 98

(1) On choisit généralement des dissolutions contenant une molécule-gramme ou une fraction de molécule-gramme des deux corps.

Exemple. — 98 grammes d'acide sulfurique (SO^4H^2) et 56 grammes de potasse (K O H) par litre d'eau.

Digitized by Google

Soient :

M le poids du composé formé.
C sa chaleur spécifique.
p le poids du calorimètre.
χ sa chaleur spécifique.
t la température initiale.
La chaleur de combinaison est

$$Q = (MC + p\chi)(\theta - t).$$

Chaleur spécifique des liquides

On emploiera, pour déterminer la chaleur spécifique des liquides, soit la méthode des mélanges, soit celle du calorimètre Bunsen.

Si on emploie la méthode des mélanges, on devra d'abord s'assurer que du mélange des liquides et de l'eau du calorimètre ne résulte aucun dégagement de chaleur.

Dans le cas contraire, on ferait la correction en tenant compte de cette chaleur dégagée (Voir *Chaleur de combinaison*).

Chaleur de fusion de la glace

Définition. — On appelle chaleur de fusion d'un corps le nombre de calories qu'absorbe l'unité de poids de ce corps pour passer de l'état solide à l'état liquide *sans changement de température.*

Mode opératoire

On emploie la méthode des mélanges. On met dans le calorimètre un certain poids d'eau dont on observe soigneusement la température t.

On verse dans le calorimètre de la glace dont on déterminera le poids par différence à la fin de l'expérience.

Soient :

m le poids de l'eau et du calorimètre réduit en eau.
t la température de l'eau.
M le poids de la glace à 0°.
θ la température finale.
La chaleur latente λ cherchée est donnée par

$$\lambda = \frac{m(t - \theta) - M\theta}{M}.$$

Digitized by Google

Nota. — Il faut avoir soin d'essuyer avec un papier buvard les morceaux de glace introduits pour ne pas ajouter d'eau à l'état liquide.

Mesure de la chaleur latente de vaporisation

Définition. — On appelle chaleur de vaporisation d'un corps à une *certaine température* le nombre de calories absorbées par ce corps pour passer de l'état liquide à l'état de vapeur saturante à cette température.

Appareil de M. Berthelot

Description. — L'appareil de M. Berthelot est entièrement en

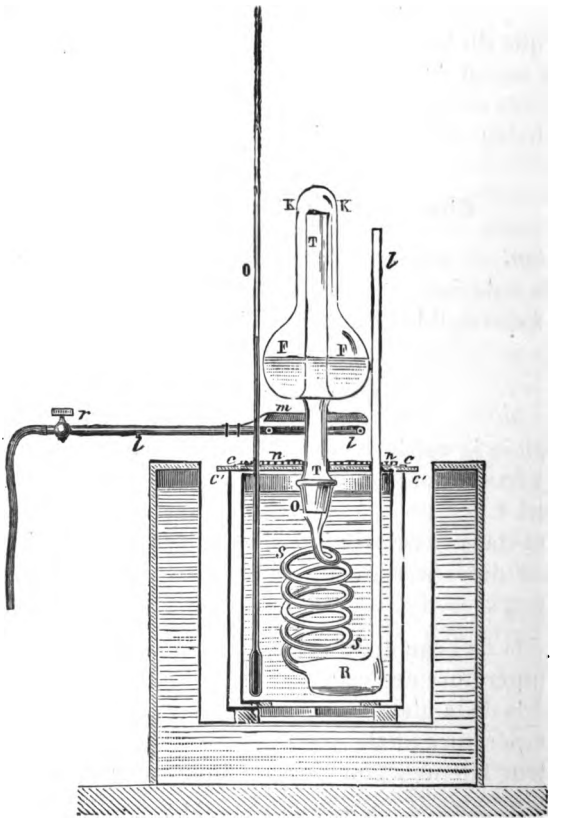


Fig. 99

Digitized by Google

verre. Il se compose d'une fiole FF (*fig. 99*) de 100cc environ dont le col K est fermé à la lampe et dont le centre est traversé par un large tube vertical T soudé, qui descend plus bas et est ajusté à un serpentin S, qui plonge dans le calorimètre de M. Berthelot. Le serpentin se continue par une chambre R qui communique avec l'atmosphère par un tube central *t*. Une grille à gaz annulaire permet de chauffer la fiole F. Des morceaux de carton recouverts d'une feuille métallique protègent le calorimètre contre le rayonnement de la grille à gaz.

Mode opératoire

On place en F le liquide étudié. On le chauffe. La vapeur, descendant par le tube T, vient se condenser en R en rendant au calorimètre sa chaleur de vaporisation. La différence de poids du serpentin avant et après l'expérience donnera le poids de liquide condensé.

La quantité de chaleur dégagée se déduit des observations du calorimètre.

Soient :

p le poids du liquide condensé.
P le poids en eau du calorimètre.
T la température d'ébullition du liquide.
t la température initiale du calorimètre.
θ — finale —
c la chaleur spécifique du liquide.
λ la chaleur de vaporisation. On a :

Chaleur perdue par la vapeur :

$$p\lambda.$$

Chaleur perdue par le liquide :

$$pc\,(T - \theta).$$

Chaleur gagnée par le calorimètre :

$$P\,(\theta - t);$$

d'où :

$$p\lambda + pc\,(T - \theta) = P\,(\theta - t);$$

d'où on tirera λ.

$$\lambda = \frac{P\,(\theta - t) - pc\,(T - \theta)}{p}.$$

Digitized by Google

TABLEAU DES CHALEURS SPÉCIFIQUES

De quelques corps, de 0° à 100°, d'après Regnault

DÉSIGNATION DES CORPS	CHALEURS spécifiques	DÉSIGNATION DES CORPS	CHALEURS spécifiques
Fer	0,11379	Oxyde de nickel	0,16234
Zinc	0,09555	— de nickel calciné à la forge	0,15885
Cuivre	0,09515	Magnésie	0,24394
Cadmium	0,05669	Oxyde de zinc	0,12480
Argent	0,05701	Peroxyde de fer (fer oligiste)	0,16695
Arsenic	0,08140	Colcothar calciné	0,17569
Plomb	0,03140	Acide arsénieux	0,12786
Bismuth	0,03084	Oxyde de chrome	0,17960
Antimoine	0,05077	— de bismuth	0,06053
Étain des Indes	0,05623	Sélénium	0,0837
— anglais	0,05695	Tellure	0,05155
Nickel	0,10863	Urane	0,06190
Cobalt	0,10696	Tungstène	0,03636
Platine laminé	0,03243	Molybdène	0,07218
— en mousse	0,03293	Nickel carburé	0,11192
Palladium	0,05927	Cobalt carburé	0,11714
Or	0,03244	Acier	0,11848
Soufre	0,20259	Fonte de fer blanche de Bourgogne	0,12983
Iode	0,05412	Phosphore de 10° à 30°	0,1887
Plomb 1 at. ; étain 2 at. ; bismuth 2 at.	0,06082	Carbone : Charbon de bois	0,24150
Alliage Bourbouze	0,180	Carbone : Diamant	0,24680
Mercure	0,03332	Carbone : Plombagine	0,21800
Protoxyde de plomb en poudre	0,05118	Iridium impur	0,1887
Protoxyde de plomb fondu	0,05089	Manganèse très carburé	0,14411
Oxyde de mercure	0,05179	Verre	0,19768
Protoxyde de manganèse	0,15701		
Oxyde de cuivre	0,14201		

Digitized by Google

DÉSIGNATION DES CORPS	CHALEURS spécifiques
ALLIAGES — OXYDES	
Laiton	0,09391
Plomb 1 at. ; étain 1 at.	0,04073
— 1 at. ; étain 2 at.	0,04506
— 1 at. ; étain 2 at., et oxyde d'antimoine	0,09009
Alumine (corindon)	0,19762
— (saphir)	0,21732
Aluminium	0,128
Acide silicique	0,19132
— borique	0,23743
Oxyde de fer magnétique	0,16780
Protosulfure de fer	0,13570
Sulfure de nickel	0,12813
— cobalt	0,12512
— zinc	0,12303
— plomb	0,05086
— mercure	0,05117
Protosulfure d'étain	0,08365
Sulfure d'antimoine	0,08403
Sulfure de bismuth	0,06002
Bisulfure de fer (pyrite)	0,13009
— d'étain	0,11932
Sulfure de molybdène	0,12334
— de cuivre	0,12118
— d'argent	0,07460
Pyrite magnétique	0,16023
Chlorure de sodium	0,21401
— de potassium	0,17295
— antimoine 1 at.	0,04621
Bismuth 1 at. ; étain 2 at. ; antimoine 1 at. ; zinc 2 at.	0,05657
Plomb 1 at. ; étain 2 at. ; bismuth 1 at.	0,04476
Protochlorure de mercure	0,05205
— de cuivre	0,13827
Chlorure d'argent	0,09109
— de baryum	0,08957
— de strontium	0,11990

Chaleur latente de fusion

Mercure	2,8
Phosphore	5,3
Soufre	9,4
Iode	11,7
Etain	14,2
Brome	16,2
Argent	21,7
Zinc	28,1
Glace	79,5

Chaleur totale de vaporisation de quelques liquides

Brome	50,95
Ether iodhydrique	58,95
Sulfure de carbone	96,99

Digitized by Google

Ether chlorhydrique	97,70
— sulfurique	109,67
— acétique	154,49
Essence de térébenthine	139,15
Essence de citron	160,49
Alcool amylique	211,78
— absolu	271,49
Eau	637

Chaleur totale de vaporisation de l'eau à une température quelconque t (Regnault) :

$$Q = 606{,}5 + 0{,}305\,t$$

DÉTERMINATION DU POINT DE FUSION

DES CORPS SOLIDES

Lois de la fusion :

1° La température de fusion d'un corps est toujours la même dans les mêmes conditions. C'est une donnée spécifique de ce corps.

2° Quand un corps fond, sa température reste constante tant qu'il reste une parcelle du corps à l'état solide.

La détermination de la température de fusion d'un corps est une des opérations les plus délicates de la physique, cette température variant beaucoup avec l'état de pureté.

De plus, pour certains corps, la fusion se fait irrégulièrement, ce sont ceux qui ne prennent pas immédiatement l'état liquide, mais passent par tous les degrés intermédiaires de fluidité entre l'état solide et l'état liquide.

Pour ces corps, il faudra étudier, pendant tout le temps que dure le changement d'état, la marche du thermomètre et prendre comme température de fusion celle à laquelle le thermomètre demeure le plus longtemps stationnaire. Encore cette détermination n'est-elle pas toujours très facile.

Nous indiquerons seulement deux méthodes expérimentales :

1° Méthode directe.

On place le corps étudié dans un tube de verre effilé à son extrémité, et de façon que le corps s'arrête avant la partie rétrécie. On met le tube à côté d'un thermomètre très sensible, dans un ballon contenant de l'eau que l'on chauffe.

Digitized by Google

On est prévenu de la fusion lorsque le corps, devenu fluide, s'allonge dans le tube et pénètre dans la partie solide. On lit à ce moment l'indication du thermomètre.

2° Méthode de la surfusion.

M. Gernez s'est servi, pour déterminer le point de fusion, ou plus exactement, le point de solidification, d'une méthode basée sur la surfusion.

Lorsqu'on refroidit lentement un corps fondu, en évitant toute agitation, on constate que l'état liquide subsiste bien au-dessous de la température à laquelle le corps a été fondu. Si on détermine alors la solidification, on voit le thermomètre remonter : la température à laquelle il s'arrête marque le point de fusion.

Nous prendrons comme exemple le cas du phosphore.

On prend un tube de verre fermé à l'une de ses extrémités et on le nettoie avec soin à l'alcool, à l'acide sulfurique, à la potasse, à l'eau distillée. On verse dans ce tube de l'eau pure et on introduit de petits bâtons de phosphore. On ajoute à l'eau quelques gouttes d'acide azotique.

On fait fondre le phosphore au bain-marie. En refroidissant lentement, on peut amener le phosphore ainsi fondu à 4 ou 5° au-dessous de son point de fusion, sans qu'il prenne l'état solide. Si l'on introduit alors dans la masse liquide une tige de fer avec laquelle on a simplement touché du phosphore, la masse se solidifie aussitôt et le thermomètre remonte à 44°.

Nous ne détaillerons pas ici une autre méthode, qui semble plus précise et qui est due à M. Himly. Nous nous contenterons d'indiquer que le principe de cette méthode est de constituer un circuit électrique dans lequel le courant passe au moment précis où le corps fond. Le courant met ainsi en marche une sonnerie. L'observateur, prévenu, regarde aussitôt le thermomètre.

Température d'ébullition

Lois de l'ébullition.

1° A la même pression, la température d'ébullition d'un liquide est toujours la même. C'est aussi une constante spécifique de ce liquide.

2° Lorsqu'un liquide bout, sa température reste constante tant que dure l'ébullition.

3° Quant un liquide entre en ébullition, la force élastique

Digitized by Google

de sa vapeur est égale à la pression qui s'exerce à sa surface.

Ces deux dernières lois serviront de bases aux méthodes expérimentales qui serviront à déterminer la température d'ébullition d'un liquide.

Première méthode. — On place un thermomètre au-dessus d'un liquide et très près de sa surface, de façon qu'il soit entouré de la vapeur. On fait bouillir le liquide et on observe le thermomètre. On note sa température lorsqu'il demeure stationnaire.

Remarque. — C'est en sens inverse la méthode que nous avons appliqué pour fixer le point 100 du thermomètre au moyen de l'étuve de Regnault ou de celle de M. Berthelot.

Deuxième méthode. — On construit un petit tube barométrique analogue au tube de Mariotte. La petite branche étant complètement remplie de mercure et le niveau dans la grande branche, inférieur de quelques centimètres au niveau dans la petite branche, on introduit dans celle-ci quelques gouttes du liquide étudié. On place le tout dans un ballon contenant de l'eau et on chauffe. Lorsque le liquide entre en ébullition, la force élastique de sa vapeur devenant égale à la pression atmosphérique, les niveaux du mercure sont sur un même plan horizontal. On observe à ce moment un thermomètre placé à côté du tube barométrique (1).

Application de la température d'ébullition

De même que nous nous sommes servis de la pression barométrique pour l'évaluation de la hauteur d'un lieu, de même nous pouvons nous servir des points d'ébullition de l'eau pour déterminer une hauteur.

Appelons t la température d'ébullition à la station inférieure.

Appelons t' la température d'ébullition à la station supérieure.

On a une valeur approchée de la hauteur par le produit

$$294\,(t - t').$$

(1) Cette seconde méthode n'est évidemment applicable qu'aux liquides dont le point d'ébullition est inférieur à celui de l'eau.

Digitized by Google

POINTS DE FUSION ET D'ÉBULLITION

SUBSTANCES	TEMPÉRATURE de fusion	TEMPÉRATURE d'ébullition — Pression 0,760
Acide acétique concentré	17	120
— azotique anhydre	29,5	50
— — monohydraté	— 47	86
— margarique	60	
— stéarique	70	
— sulfureux	— 78,9	— 10
— sulfurique monohydraté	— 34	326
Acier	1300 à 1400	
Alcool absolu	— 90	78,3
Alcool amylique (huile de pommes de terre)	— 23	131,8
Alcool méthylique (esprit de bois)		66,3
Aldéhyde éthylique		21
Alliage, 3 équiv. plomb, 1 d'étain	289	
— 5 équiv. plomb, 3 d'étain et 8 bismuth (métal Darcet)	94	
— Bourbouze		
Aluminium	625	
Antimoine	440	
Argent	954	
Arsenic	210	
Azote (protoxyde d')		— 88
Azotate d'argent	218	
Benzine		80,8
Bromure d'argent	380	
Bronze (environ)	900	
Blanc de baleine	49	
Cadmium (environ)	500	
Camphre de Bornéo	195	215

Digitized by Google

SUBSTANCES	TEMPÉRATURE de fusion	TEMPÉRATURE d'ébullition — Pression 0,760
Camphre du Japon	175	205
Carbonate de potasse		
dissolution saturée		135
— de soude		
dissolution saturée		104,6
Chlorate de potasse	359	
Chlore liquide	— 75	— 33
Chlorure de baryum, dissolution saturée		104,4
— de calcium, —		179,5
— de sodium, —		108,4
Cire jaune	76,2	
— blanche	68,7	
Colophane	135	
Cuivre (environ)	1054	
— jaune —	940	
Eau de mer	— 2,5	103,7
Essence d'amandes amères		176
— de citron		167
— de moutarde	— 10	145
— de térébenthine		156,8
Etain	235	
Ether sulfurique		35,5
— acétique		74,1
— chorhydrique		12,5
— Iodhydrique		70
— formique		55,7
— oxalique		183
Fer doux français (environ)	1500	
Fonte de fer	1050 à 1500	
Graisse de mouton	51	
Huile de lin	— 20	
— d'olive	2,5	
— de palme	29	
— de ricin	— 18	
Iode	113	176

Digitized by Google

SUBSTANCES	TEMPÉRATURE de fusion	TEMPÉRATURE d'ébullition — Pression 0,760
Iodure d'argent	527	
Lithium	180	
Mercure	— 39,5	357
Naphtaline	79	210
Nitrobenzine	3	213
Or (environ)	1045	
— au titre de la Monnaie —	1180	
Palladium —	1500	
Pétrole		106
Paraffine	43,7	370
Phosphore	44,2	287
Platine	1775	
Plomb	325	
Sélénium	217	665
Soufre	113,6	440
Spermaceti (blanc de baleine)	49	
Stéarine	61	
Succin	288	
Sucre de canne	160	
— de raisin	100	
Suif	33	
Sullure de carbone		46,2
Tellure (environ)	525	
Urée	120	
Zinc (environ)	431	930

Digitized by Google

MESURE DE LA DENSITÉ DES GAZ

La densité d'un gaz est le rapport des poids de volumes égaux de ce gaz et d'air pris dans les conditions normales à la température de 0° et à la pression d'une colonne de mercure de 760 millimètres.

La méthode employée par Regnault consiste essentiellement dans les deux opérations suivantes :

1° Détermination du poids de gaz qui remplit à 0°, et sous une pression connue, voisine de 760 millimètres, un ballon de verre d'une dizaine de litres.

2° Détermination, par une expérience analogue, du poids de l'air qui remplit le ballon dans des conditions analogues.

En appliquant au gaz et à l'air la loi de Mariotte, on en déduit les poids de gaz et d'air qui rempliraient le ballon à zéro et 760. Le rapport de ces poids est la densité cherchée.

Nous ne détaillerons pas la méthode employée par Regnault. Nous rappellerons simplement qu'il employait la méthode des ballons compensateurs pour éviter les incertitudes produites dans la pesée par les changements de température, d'état hygrométrique et de pression subies par l'atmosphère pendant la durée des expériences.

Mode opératoire

Pour remplir le ballon du gaz étudié, on y fait le vide. On le met ensuite en communication, par l'intermédiaire de tubes desséchants avec l'appareil producteur du gaz.

On recommence plusieurs fois l'opération, de façon à être assuré que le ballon est bien plein de gaz sec à la pression atmosphérique. Toutes ces opérations se font à zéro, le ballon étant plongé dans la glace fondante.

On note à ce moment la pression atmosphérique H_1 et on ferme le robinet du ballon.

On retire le ballon de la glace fondante, on l'essuie avec un linge légèrement humide et on le laisse prendre la température du laboratoire.

Digitized by Google

Si le ballon compensateur ne fait pas exactement équilibre à celui-ci, on complète la tare par des poids marqués, soit p_1 ces poids marqués.

On fait le vide dans le ballon jusqu'à une faible pression h_1. On recommence la pesée, soit P_1 les poids ajoutés pour parfaire la tare. $P_1 - p_1$ représente le poids du gaz enlevé.

On refait les mêmes déterminations avec l'air. Soient $H_2 h_2 p_2 P_2$ les valeurs trouvées correspondant à $H_1 h_1 p_1 P_1$.

La densité cherchée est exprimée par

$$D_0 = \frac{P_1 - p_1}{P_2 - p_2} \times \frac{H_2 - h_2}{H_1 - h_1}.$$

THERMOMÈTRE A AIR

Regnault a donné au thermomètre à air une forme commode qui en simplifie l'emploi. C'est cette forme que nous indiquerons.

L'enveloppe thermométrique est un cylindre de verre A surmonté d'un tube fin *a b* recourbé à son extrémité et terminé par une pointe effilée (*fig. 100*).

Mode opératoire

On place cette enveloppe dans l'enceinte dont on veut déterminer la température. On met le tube en communication, soit avec une machine pneumatique, soit par l'intermédiaire de tubes desséchants avec l'atmosphère. On fait le vide et on laisse rentrer l'air alternativement à plusieurs reprises. Lorsqu'on est assuré que l'appareil est bien plein d'air sec à la température de l'enceinte et à la pression atmosphérique, on bouche la pointe effilée avec un chalumeau. On note à ce moment la pression atmosphérique H.

On transporte alors le tube, et le renversant sur un support représenté par la figure 100, de façon que la pointe plonge dans une cuvette contenant du mercure. On entoure le réservoir de glace fondante et on brise la pointe sous le mercure. Celui-ci monte dans l'appareil. Quand il a cessé de monter, c'est-à-dire quand l'appareil est bien à zéro, on bouche l'extrémité du tube avec de la cire molle. On enlève le tube, on note la pression H'

Digitized by Google

et on mesure au cathétomètre la hauteur h du mercure soulevé. On pèse le tube avec le mercure qu'il contient, soit P_1, son poids.

On l'emplit complètement de mercure. On le pèse de nou-

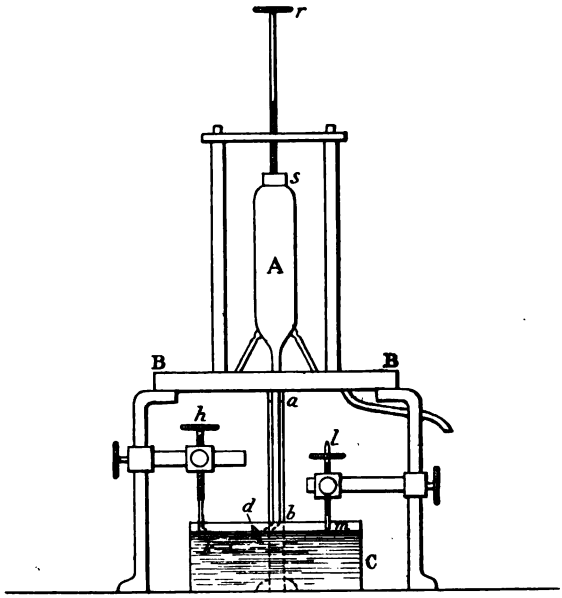


Fig. 100

veau. Soit P_2 son poids. Soit enfin p le poids de l'enveloppe seule, poids déterminé avant l'expérience.

En appelant α le coefficient de dilatation de l'air ; K le coefficient de dilatation cubique du verre ; D_0 la densité du mercure à zéro, la température cherchée T sera donnée par la formule

$$\frac{P_2 - p}{D_0} \cdot \frac{H}{760} \cdot \frac{1 + KT}{1 + \alpha T} = \frac{P_2 - P_1}{D_0} \cdot \frac{H' - h}{760},$$

$$\text{d'où } \frac{1 + KT}{1 + \alpha T} = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - p} \cdot \frac{H' - h}{H}.$$

Désignons par A le second membre

$$\frac{1 + KT}{1 + \alpha T} = A,$$

$$\text{d'où } 1 + KT = A + A\alpha T$$

$$T(K - A\alpha) = A - 1,$$

$$T = \frac{A - 1}{K - A\alpha}.$$

Digitized by Google

Remarque. — La même opération pourra servir à déterminer K si on connaît T.

DENSITÉ DES VAPEURS

Méthode de Dumas

On appelle densité d'une vapeur le rapport qui existe entre le poids d'un volume quelconque de cette vapeur et le poids d'un

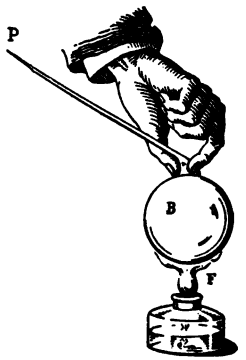


Fig. 101

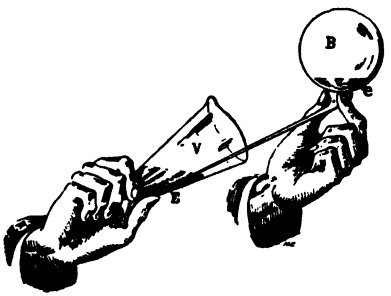


Fig. 102

égal volume d'air pris dans les mêmes conditions de température et de pression.

Mode opératoire

Prendre par la méthode des doubles pesées le poids d'un ballon B, à col effilé, d'une capacité de 250 à 300 grammes, rempli d'air sec. Avoir soin de casser la pointe avant la pesée.

Noter la pression H, ainsi que la température *t*. Chauffer le ballon B sur la flamme d'une lampe à alcool (*fig. 101*).

Plonger la pointe E dans le liquide dont on veut prendre la densité de vapeur, en ayant soin de tenir le ballon dans une position telle que le liquide ne vienne pas toucher aux parois chaudes (*fig. 102*).

Assujettir le ballon sur le support S (*fig. 103*), à l'aide des vis de serrage de la bague mobile. Le faire plonger, ainsi dis-

Digitized by Google

posé, dans le bain, que l'on devra amener à une température notablement supérieure au point d'ébullition du liquide à vaporiser.

Agiter l'eau en faisant tourner la palette A autour du centre O.

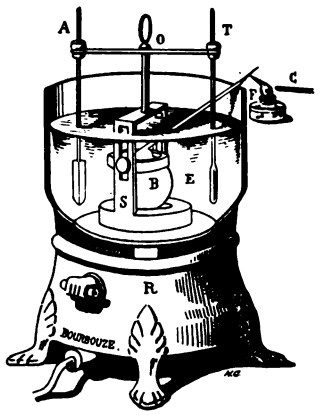


Fig. 103

Dans ces conditions, la vapeur s'échappe par la pointe effilée en entraînant l'air du ballon. Fermer la pointe avec le chalumeau C, après s'être assuré qu'il ne sort plus de vapeur. Noter la température t', qui est celle de la vapeur, ainsi que la pression H′.

Retirer le ballon de son support, le peser à nouveau après l'avoir essuyé avec du papier buvard.

Le nouveau poids P′ est égal au poids du ballon P, plus le poids de la vapeur.

Le volume V s'obtient en pesant ou en mesurant (*fig. 105*) l'eau ou le mercure, qui a pénétré

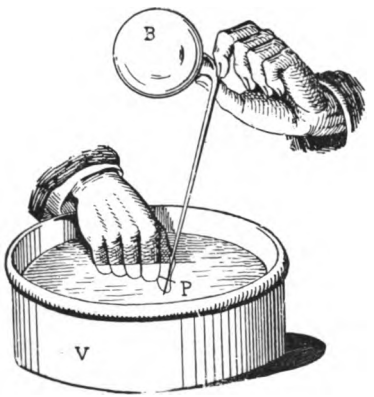


Fig. 104

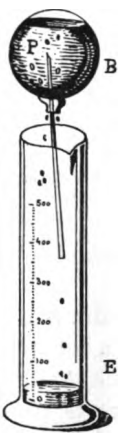


Fig 105

dans le ballon par la pointe préalablement coupée (*fig. 104*) sous l'un ou l'autre de ces liquides.

Soient :

P Poids du ballon rempli d'air sec.

P′ — de vapeur.

Digitized by Google

π poids de l'air que le ballon contient lors de la première pesée.

V volume du ballon à la température t.

t température ambiante.

t' — de la vapeur.

H pression corrigée au début de l'expérience.

H′ — au moment de la fermeture du ballon.

α coefficient de la dilatation de l'air. . $= 0{,}00367$.

K — — du verre. $= 0{,}000027$.

$0^{g},001293$ poids d'un centimètre cube d'air à 0°, sous la pression 760.

$$\pi = V.\ 0{,}001293\ \frac{H}{760}\ \frac{1}{1+\alpha t}.$$

$P - \pi$ poids du ballon vide.

$P' - (P - \pi) = P' - P + \pi$ poids de la vapeur seule.

$V[1 + K(t' - t)]$ volume du ballon à t'^{os}.

$V[1 + K(t' - t)]\ 0{,}001293\ \frac{H'}{760}\ \frac{1}{1+\alpha t}$ poids de l'air sec qui emplirait le ballon à $t°$ et à la pression H′.

D Densité cherchée.

$$D = \frac{P' - P + \pi}{V[1 + K(t' - t)\ 0{,}001293\ \frac{H'}{760}\ \frac{1}{1+\alpha t'}} =$$

$$= D = \frac{(P' - P + \pi)\ 760\ (1 + \alpha t')}{V[1 + K(t' - t)]\ 0{,}001293\ H'} =$$

$$D = \frac{\left[P' - P + \left(V \times 0{,}001293 \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1+\alpha t}\right)\right] 760\,(1+\alpha t')}{V[1 + K(t' - t)]\ 0{,}001293\ H'}.$$

Exemple. — Une expérience pratiquée sur la vapeur d'éther a donné :

$P = 52^{g},285$	$t = 18°$	$H = 757^{mm},9$
$P' = 52^{g},581$	$t' = 100°$	$H' = 757^{mm},6$
	$V = 350^{cm.c.}$	

$$D = \frac{\left\{\left[52{,}581 - 52{,}285 + \left(350 \times 0{,}001293 \times \frac{757{,}9}{760} \times \frac{1}{1+0{,}00367 \times 18}\right)\right]\right.}{\left.760\ (1 + 0{,}00567 \times 100)\right\}} =$$

$$350\,[1 + 0{,}000027\,(100 - 18)]\ 0{,}001293 \times 757{,}6$$

$$D = 2{,}174.$$

Digitized by Google

Densités des vapeurs

SUBSTANCES	FORMULES chimiques	DENSITÉS par rapport à l'air
Soufre à 500°	S	6,62
Soufre à 1000°	S	2,22
Eau	H^2O	0,623
Phosphore	Ph	4,42
Sulfure de carbone	CS^2	2,645
Ether sulfurique	$C^4H^{10}O$	2,5860
Iode	I_o	8,72
Essence de térébenthine	C^5H^8	4,764
Mercure	Hg	6,98

Digitized by Google

Tableau des poids spécifiques

des densités des gaz et des vapeurs

NOMS	FORMULES	DENSITÉS	POIDS du litre
Oxygène	O	1,1036	1,429
Hydrogène	H	0,0695	0,08988
Azote	Az	0,973	1,258
Chlore	Cl	2,47	3,19
Brome	Br	5,56	7,18
Iode	I	8,83	11,42
Fluor	Fl	1,32	1,71
Soufre	S	2,23	2,88
Sélénium	Se	5,45	7,05
Tellure	Te	8,96	11,52
Phosphore	Ph	4,30	5,58
Arsenic	As	10,43	13,48
Mercure	Hg	6,96	8,99
Cadmium	Cd	3,89	5,04
Acide chlorhydrique	HCl	1,269	1,64
Acide bromhydrique	H Br	2,81	3,64
Acide iodhydrique	H I	4,44	5,75
Acide fluorhydrique	H F	0,695	0,899
Vapeur d'eau	H O	0,626	0,809
Ammoniaque	AzH^3	0,591	0,763
Hydrogène phosphoré	PH^3	1,182	1,52
Protoxyde d'azote	AzO	1,530	1,977
Bioxyde d'azote	AzO^2	1,043	1,347
Acide azoteux	AzO^3	2,64	3,41
Acide hypoazotique	AzO^4	1,60	2,07
Acide sulfureux	SO^2	2,23	2,88
Oxyde de carbone	CO	0,973	1,258
Acide carbonique	CO^2	1,531	1,978
Acétylène	C^4H^4	0,904	1,258
Ethylène ou gaz oléfiant	C^2H^4	1,075	1,348
Formène ou gaz des marais	CH^4	1,556	0,718
Cyanogène	CAz	1,808	2,338

Digitized by Google

FABRICATION DE LA GLACE A L'AIDE DE L'APPAREIL CARRÉ

L'appareil Carré se compose de deux parties essentielles, une chaudière et un congélateur, reliées entre elles par un tube de communication. Il renferme dans son intérieur une solution aqueuse de gaz ammoniac très concentrée, marquant 0,88 au densimètre. Avant l'opération, le liquide doit se trouver tout entier dans la chaudière. On obtient ce résultat en couchant l'appareil, de manière que le congélateur occupe la partie haute, et en le maintenant dans cette position pendant dix minutes environ.

Mode opératoire

1° Disposer l'appareil de telle sorte que la chaudière s'adapte exactement sur un fourneau à bois et que le congélateur repose sur le fond d'un baquet rempli d'eau froide. Le niveau de celle-ci doit s'élever à 2 ou 3 centimètres au-dessus du sommet du congélateur;

2° Verser un peu d'huile dans la cavité tubulaire qui se trouve à la partie supérieure de la chaudière, et placer dans cette cavité le thermomètre spécial;

3° Chauffer modérément la chaudière jusqu'à ce que le thermomètre de la chaudière ait atteint la hauteur marquée par une flèche, laquelle correspond à 130° centigrade;

4° Dès que la température a atteint 130°, enlever la chaudière du feu, et la transporter dans le baquet, de manière qu'elle plonge dans l'eau, jusqu'aux trois quarts seulement de sa hauteur. Le congélateur se trouvant alors en dehors du baquet, boucher sa partie inférieure, introduire dans sa cavité interne le cylindre contenant 900 grammes de l'eau à congeler, et remplir avec de l'alcool l'espace annulaire qui reste libre entre les deux parois concentriques. Entourer enfin le congélateur d'une enveloppe en laine bien sèche. Au bout d'une heure, l'eau du cylindre est entièrement gelée;

5° Pour détacher la glace, il suffit de plonger le cylindre pen-

Digitized by Google

dant quelques instants dans l'eau du baquet. La glace fond au contact de la paroi, et en renversant le cylindre, on obtient un bloc solide, très consistant ;

6° A la fin de chaque opération, on recueille l'alcool introduit dans l'espace annulaire, afin qu'il puisse servir pour une opération ultérieure.

MÉLANGES RÉFRIGÉRANTS

PRODUITS		ABAISSEMENT de température
—		—
Azotate d'ammoniaque	1	26°
Eau distillée	1	
Sulfate de soude cristallisée	8	27°
Acide chlorhydrique	5	
Neige ou glace pilée	1	17°
Sel marin	1	
Neige ou glace pilée	3	48°
Chlorure de calcium hydraté	4	
Neige ou glace pilée	4	environ
Acide sulfurique	1	50°

Digitized by Google

HYGROMÉTRIE

Définition. — On appelle *état hygrométrique* le rapport du poids p de vapeur d'eau actuellement contenu dans l'air au poids P que cet air contiendrait s'il était saturé de vapeur d'eau à la même température.

Considérons un volume V d'air, appelons a le poids du litre d'air à zéro degré et 760, soit d la densité de la vapeur d'eau. Le poids p de vapeur contenue dans ce volume V à la température de $t°$ est, en appelant f la force élastique actuelle :

$$p = V \times a \times d \times \frac{f}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Le poids P qui serait contenu dans ce même volume si la vapeur était saturante, est, en appelant F la force élastique maxima de la vapeur d'eau à la température t :

$$P = V \times a \times d \times \frac{F}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

En prenant le rapport, on a :

$e = \frac{p}{P} = \frac{f}{F}$, e étant l'état hygrométrique.

On voit donc, par cette formule, que l'état hygrométrique peut également être défini comme le rapport de la force élastique actuelle de la vapeur d'eau à la force élastique maxima à la même température.

De là deux méthodes bien distinctes pour déterminer l'état hygrométrique :

La méthode des poids, ou méthode chimique — la méthode des forces élastiques ou méthode de condensation.

Digitized by Google

Nous ne détaillerons pas la méthode chimique qui, en réalité, à cause de la longueur de l'expérience, ne peut fournir qu'une valeur moyenne de l'état hygrométrique pendant la durée de la manipulation; nous n'exposerons que les méthodes hygrométriques fondées sur le principe de la condensation. Ce principe, dû à Julien Leroy, médecin de Montpellier, s'énonce de la façon suivante :

Si dans une atmosphère illimitée on vient à refroidir une portion de paroi, il arrivera un moment où l'on atteindra la température pour laquelle la force élastique actuelle de la vapeur d'eau sera maxima; à ce moment il y aura condensation de la vapeur d'eau sur la paroi refroidie.

Pour fixer les idées, prenons un exemple numérique; supposons que la température actuelle étant 15°, la force élastique de la vapeur d'eau soit représentée par le poids d'une colonne de mercure de 7 millimètres. Refroidissons une portion de paroi; quand la température de la paroi atteindra 6°, température à laquelle la force élastique maxima de la vapeur d'eau est justement de 7 millimètres, il y aura condensation. Inversement, nous allons pouvoir nous servir de ce principe pour déterminer la force élastique actuelle. Il suffira pour cela, de noter la température à laquelle se produira la condensation, et nous en déduirons, au moyen des tables dressées par Regnault, la force élastique correspondante. Cette observation sert de base aux différents hygromètres à condensation, qui ne diffèrent entre eux que par le mode d'observation de la température à laquelle se produit la condensation.

Nous indiquerons successivement les modes opératoires relatifs aux hygromètres de Leroy, de Daniell, de Bourbouze, d'Alluard et de Crova.

Remarque. — Il ne faut pas confondre le principe de Leroy au principe de la condensation avec un autre principe analogue, le principe de Watt, appelé souvent principe de la paroi froide, et qui peut s'énoncer ainsi : Dans une atmosphère illimitée contenant de la vapeur d'eau, la force élastique de cette vapeur d'eau ne peut pas dépasser la force élastique maxima correspondant à la température du point le plus froid. C'est sur ce principe que sont fondées les machines à vapeur; c'est aussi le principe *de la distillation*.

Digitized by Google

HYGROMÈTRE DE LEROY

L'hygromètre de Julien Leroy se compose simplement d'une petite timbale métallique à parois extérieures parfaitement polies et d'un thermomètre sensible dont le réservoir est maintenu au milieu du liquide contenu dans le vase métallique, à l'aide du support S.

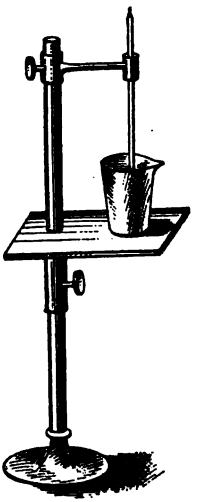


Fig. 106

Pour connaître la force élastique de la vapeur d'eau contenue dans l'air, il suffit de refroidir progressivement l'eau dans laquelle plonge le thermomètre et de noter la température qu'il indique lorsque la vapeur d'eau commence à se précipiter sous forme de rosée sur les parois du vase.

Connaissant cette température donnée par le thermomètre, on cherche dans la table la force élastique correspondante f de la vapeur, ainsi que celle qui correspond à la température ambiante T donnée par le thermomètre extérieur.

En désignant par f la force élastique maxima correspondante à t et par F celle correspondante à T, l'état hygrométrique sera exprimé par le rapport $\frac{f}{F}$.

Mode opératoire

Abaisser graduellement la température de l'eau contenue dans le vase V en y jetant avec précaution de petits fragments de glace ou d'azotate d'ammoniaque. — Observer et noter la température indiquée par le thermomètre T′ au moment précis où la vapeur commence à se déposer sous forme de rosée sur les parois du vase.

On aura ainsi la température à laquelle il a fallu refroidir l'air pour que la vapeur qu'il contient au moment de l'expérience suffise pour le saturer.

Digitized by Google

Exemple :

Soient : t température du point de rosée. . . = 0,5
T — ambiante. . . . . = 12
f force élastique correspondante à t . = 4,77
F — — à T. = 10,46

On aura $\frac{f}{F} = \frac{4,77}{10,46} = 0,45$ fraction de saturation.

Détermination de l'état hygrométrique à l'aide de l'hygromètre de Daniell

Cet instrument se compose d'un tube deux fois recourbé à angle droit. Une boule en verre mince est soudée à chaque extrémité : l'une V, en verre bleu, assez transparente pour laisser voir le liquide ; l'autre M, en verre blanc, recouverte d'une mousseline. Dans la plus longue branche, est soudé un petit thermomètre très sensible dont le réservoir seul doit plonger dans le liquide qui ne devra jamais remplir complètement la boule V.

L'appareil doit être complètement purgé d'air. Un thermomètre extérieur donne la température ambiante.

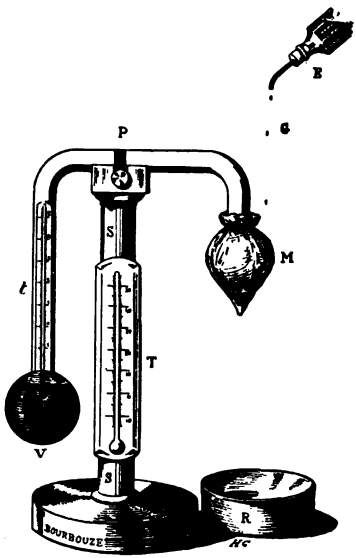


Fig. 107

Mode opératoire

S'assurer que l'éther couvre seul le réservoir du thermomètre intérieur, verser de l'éther sur la boule recouverte d'une mousseline, de façon à amener, par son évaporation, une différence de température entre les deux boules. L'éther qui est à l'intérieur de la boule V se vaporise, et les vapeurs viennent se condenser dans la boule M. Il se produit, dans ces conditions,

Digitized by Google

une distillation de V en M, et par suite un refroidissement à la boule V.

Continuer à verser goutte à goutte de manière à amener progressivement l'abaissement de température de la boule V.

Observer le petit thermomètre intérieur, et noter la température t, au moment de l'apparition du léger voile de rosée qui prend naissance au niveau du liquide de la boule V.

Observer le thermomètre extérieur qui donne la température ambiante T. Chercher dans les tables des forces élastiques les tensions correspondantes à t et à T. — En désignant par f la tension correspondante à t et par F celle correspondante à T, l'état hygrométrique sera exprimé par $\frac{f}{F}$.

La température t observée, étant toujours un peu trop basse, on devra, pour atténuer cette cause d'erreur, laisser réchauffer l'appareil et observer l'indication t' du petit thermomètre au moment de la disparition du voile. On prendra la moyenne $\frac{t+t'}{2}$ pour point de rosée.

Pour avoir des mesures plus exactes, il est bon de placer la glace G *(fig. 108)* entre l'appareil et l'observateur.

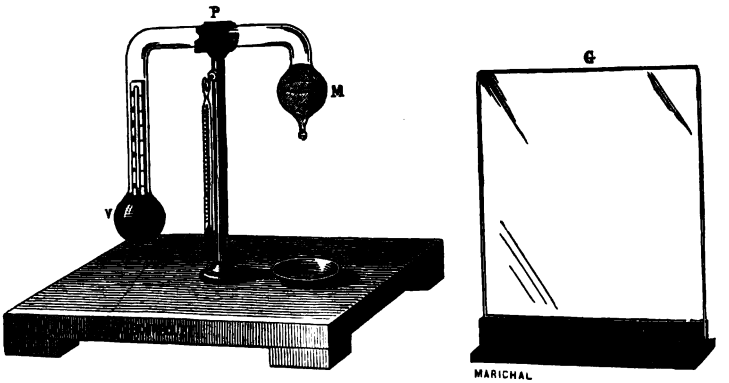


Fig. 108

HYGROMÈTRE A MIROIR DE BOURBOUZE

L'hygromètre de Daniell offre, en outre des inconvénients que nous avons signalés, des causes d'erreur qui proviennent de la présence prolongée de l'opérateur auprès de l'appareil ; il doit

Digitized by Google

par conséquent exercer une influence sur la température et sur l'état hygrométrique; il en sera de même par suite de la vaporisation de l'éther que l'on verse sur la boule M.

M. Bourbouze a construit pour nos manipulations un appa-

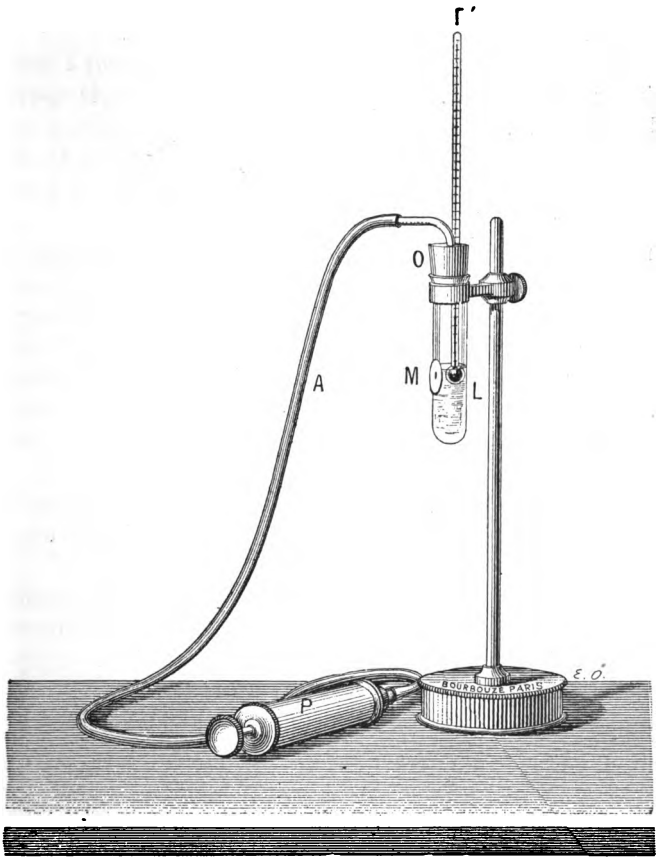


Fig. 109

reil simple de laboratoire qui est exempt des inconvénients de l'hygromètre de Daniell.

Ce modèle se compose d'un tube en verre mince fermé par un bouchon percé de trois trous : dans l'un peut glisser à frottement doux la tige d'un thermomètre sensible divisé en $\frac{1}{5}$ de degré et à réservoir sphérique; les deux autres servent à produire l'évaporisation de l'éther. Un petit miroir argenté M est maintenu sur le tube à l'aide d'un bracelet en caoutchouc (*fig. 109*).

Digitized by Google

Mode opératoire

Verser une petite quantité d'éther dans le tube. Fixer le miroir sur ce tube, de manière à ce que son centre soit à peu près au niveau du liquide. Faire plonger seul le réservoir sphérique du thermomètre.

Dans ces conditions, si on fait l'appel d'air avec la pompe aspirante P, on verra très rapidement se produire un point de rosée à la hauteur du niveau du liquide.

La température observée au moment de l'apparition de ce point de rosée est toujours, pour la première expérience, un peu trop basse et ne doit pas, par conséquent, être notée. Pour éviter cette petite cause d'erreur, il suffit, aussitôt que le dépôt de rosée aura disparu, de recommencer à faire circuler très lentement de l'air. La température observée au moment de la nouvelle apparition du point de rosée sera, à très peu de chose près, la température du point de saturation.

Pour arriver à l'avoir avec une plus grande approximation, on devra répéter plusieurs fois l'expérience et prendre la moyenne des températures observées.

Noter la température t indiquée par le petit thermomètre. Observer le thermomètre extérieur qui donne la température ambiante T. Chercher dans les tables les tensions correspondantes à t et à T. En désignant par f la tension maximum correspondante à t et par F celle correspondante à T, l'état hygrométrique sera exprimé par le rapport $\frac{f}{F}$, ou fraction de saturation.

Exemple :

Soient t température du point de rosée . . . . . $= 4°,5$.
T — ambiante. . . . . $= 18°$.
f tension maximum de la vapeur d'eau à $4°,5$ . . . . . $= 6^{m/m},31$.
F tension maximum de la vapeur d'eau à $18°$ . . . . . $= 15^{m/m},84$.

On aura $\frac{f}{F} = E = \frac{6,31}{15,84} = 0,404$.

Digitized by Google

MÉTHODE DE REGNAULT

L'appareil de Regnault se compose d'un dé en cuivre mince argenté parfaitement poli P′ qui est scellé à l'une des extrémités

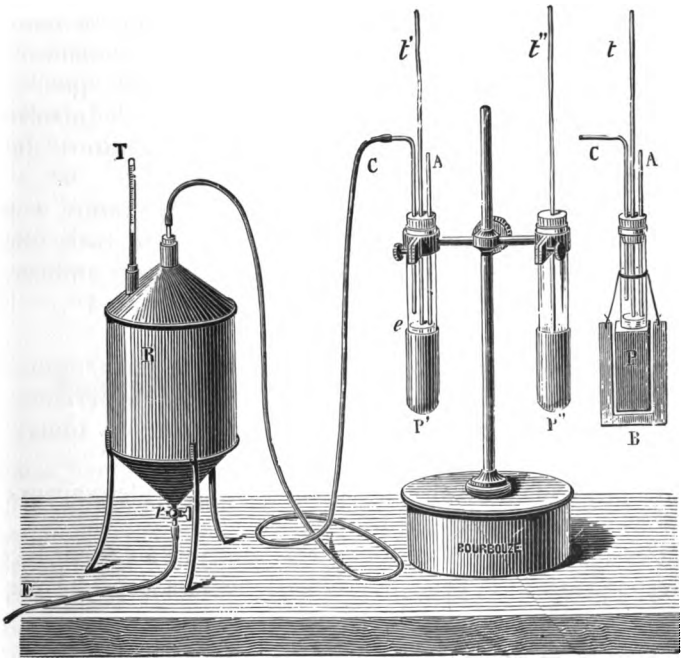


Fig. 110

du tube en verre *e*. L'ouverture est fermée par un bouchon qui est traversé par la tige d'un thermomètre très sensible. Un tube de verre mince A traverse le même bouchon et descend jusqu'au fond du dé. Un autre tube coudé *c* sert à mettre l'aspirateur R en communication avec le tube au moyen d'un long tuyau de caoutchouc. Dans un autre dé identique, placé sur le même support et ne renfermant pas de liquide, est fixé un thermomètre destiné à donner la température ambiante.

Digitized by Google

Mode opératoire

Verser de l'éther dans le tube jusqu'en *e*. — Remplir d'eau l'aspirateur R. — Faire couler l'eau en ouvrant le robinet *r*. — Dans ces conditions, il se produit une aspiration; l'air pénètre par le tube A et traverse bulle à bulle l'éther, qui se refroidit par suite de son évaporation provoquée par l'écoulement de l'air; le refroidissement devient d'autant plus rapide que l'écoulement est abondant. — Régler cet écoulement de manière à amener progressivement l'abaissement de température du dé argenté P'.

Observer le thermomètre *t'* et noter la température *t* qu'il indique au moment de l'apparition du voile de rosée sur le dé P'. — Observer et noter également la température ambiante T indiquée par le thermomètre placé dans l'autre tube P''. — Fermer le robinet *r* de l'aspirateur.

Pour obtenir d'une façon plus rigoureuse la température qui correspond au point de rosée, on devra répéter l'expérience un certain nombre de fois et prendre la moyenne de toutes les opérations.

Chercher dans les tables des forces élastiques des vapeurs les tensions correspondantes à *t* et à T.

En désignant par *f* la tension correspondante à *t* et par F celle correspondante à T, l'état hygrométrique sera exprimé par le rapport $\frac{f}{F}$.

HYGROMÈTRE D'ALLUARD

L'hygromètre d'Alluard est représenté par la figure 111. Une petite caisse prismatique S en laiton doré porte sur sa face anté-

Digitized by Google

rieure une petite fenêtre F. Dans cette cuve, on verse de l'éther par un entonnoir T″. Deux tubes T et T′, dont l'un plonge jusqu'au fond de la cuve, l'autre s'arrêtant au niveau de l'éther, permettent d'y faire barboter un courant d'air, soit par aspiration, soit par insufflation.

Un thermomètre H plonge dans l'éther et la fenêtre F permet d'observer une partie de sa graduation. Un autre H′, porté par une tige C, donne la température ambiante. Enfin une lame de laiton S′, entourant la face antérieure de la cuve et séparée d'elle par un petit intervalle, joue ici le même rôle que le dé témoin dans l'hygromètre Regnault.

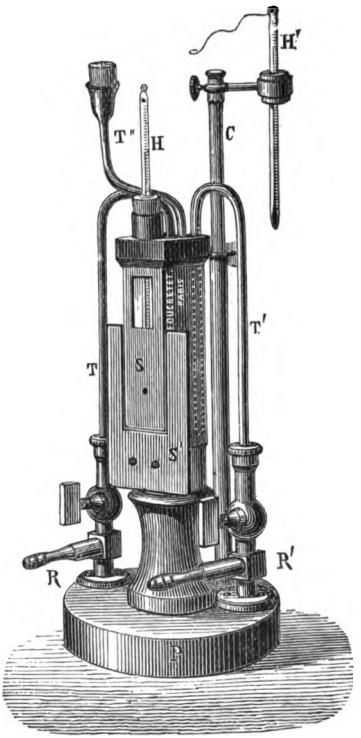


Fig. 111

Mode opératoire

Faire barboter de l'air dans l'éther au moyen d'une poire en caoutchouc attachée en R′, en observant avec une lunette les surfaces S et S′. Dès que le dépôt de rosée apparaît sur la surface S, on arrête le courant d'air, on lit la température t_1 indiquée par le thermomètre H.

On laisse disparaître la rosée et on note la température t_2 de H au moment où la disparition est complète. On prendra comme température du point de rosée $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$.

On note la température T de l'air ambiant.

On procèdera ensuite comme dans les autres méthodes hygrométriques, en cherchant dans les tables les tensions f et F de la vapeur d'eau aux températures t et T :

$$e = \frac{f}{F}.$$

Digitized by Google

HYGROMÈTRE DE CROVA

La figure 112 montre l'hygromètre de Crova. Il est composé d'un tube LL′ poli intérieurement, fermé en L′ par un verre dépoli, et en L par une loupe. Ce tube est entouré d'une boîte en laiton B dans laquelle on verse de l'éther ou du sulfure de carbone. Des tubes permettent, comme dans l'appareil d'Alluard, de faire barboter de l'air, soit par aspiration, soit par insufflation. Au moment du dépôt de rosée, on voit apparaître sur la surface intérieure du tube central des taches noires. Le phénomène est analogue à ce qui se produit avec l'appareil de M. Bourbouze, que nous verrons plus loin. L'expérience se fait de la même manière qu'avec l'hygromètre d'Alluard.

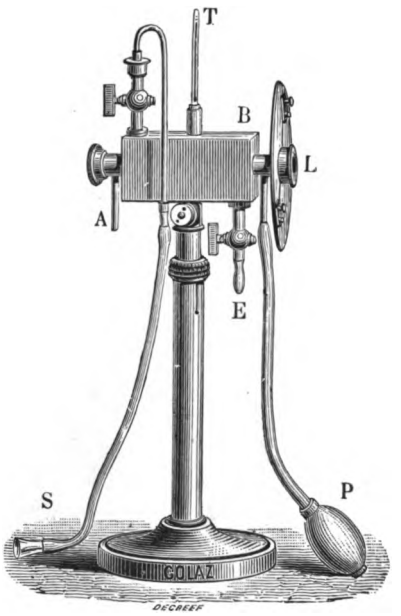


Fig. 112

HYGROMÈTRE A CONDENSATION DE BOURBOUZE

Le nouveau modèle d'hygromètre à condensation construit par M. Bourbouze est disposé de manière à éviter tous les inconvénients que nous avons indiqués.

Il se compose d'un petit tube rectangulaire métallique (*fig. 113*) dans l'intérieur duquel on a soudé à l'argent un réservoir en fer destiné à recevoir un thermomètre très sensible T′. Un miroir mince M, à faces parallèles, est ajusté sur l'un des côtés; sur

Digitized by Google

l'autre, à angle droit, est vissé un regard qui sert à régler l'introduction de l'éther dans l'appareil.

Il est fermé par un bouchon percé de deux trous : l'un pour recevoir un tube recourbé sur lequel s'adapte le tube de commu-

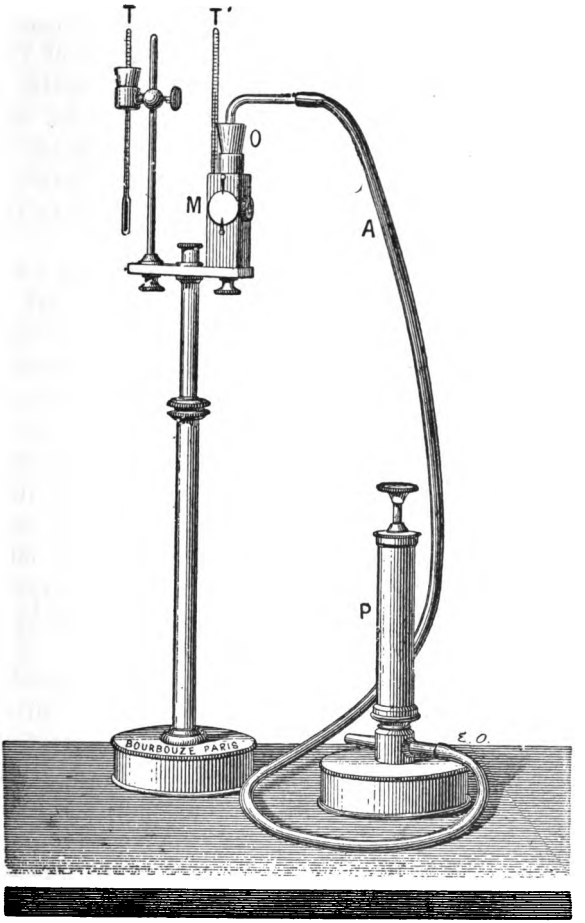


Fig. 113

nication ; l'autre, très petit, sert à la circulation de l'air. Un thermomètre T, de même sensibilité, donne la température de l'air ambiant. Enfin une petite pompe aspirante ou foulante remplace très avantageusement les différents appareils qui servent ordinairement à produire le courant d'air.

Digitized by Google

Mode opératoire

Introduire une petite quantité de mercure dans le réservoir en fer, de façon à assurer le parfait contact entre le thermomètre T′ et l'enveloppe métallique. — Verser de l'éther dans l'intérieur de l'appareil, de manière à couvrir la glace du regard. — Faire passer un courant d'air, soit par insufflation, soit par aspiration (ce qui est préférable) avec la pompe P, fixée à l'autre extrémité du tube de communication. On verra bientôt apparaître sur le miroir M un dépôt de rosée quelle que soit la température de l'air ambiant.

Observer le thermomètre T′ et noter la température t qu'il indique au moment de l'apparition du plus léger voile de rosée qui se dépose sur le miroir M. — Observer et noter également la température ambiante T indiquée par le thermomètre T.

Pour obtenir d'une façon plus rigoureuse la température qui correspond au point de rosée, on devra, comme il a déjà été dit, répéter l'expérience un certain nombre de fois et prendre la moyenne de toutes les observations de températures qui correspondent aux apparitions successives de rosée sur le miroir M.

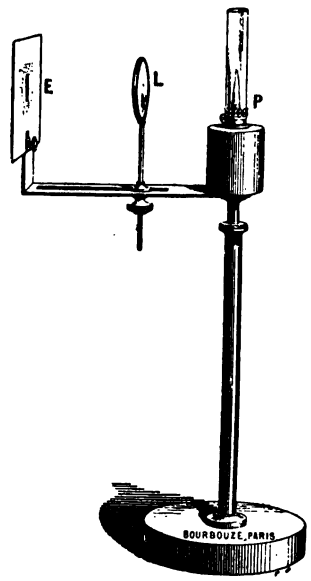


Fig. 114

Chercher dans les tables des forces élastiques de la vapeur d'eau, les forces élastiques correspondantes à t et à T.

Si l'on observe par réflexion une fente lumineuse, ou mieux la fente d'un collimateur semblable à ceux appliqués aux goniomètres Babinet, on constatera que le dépôt de rosée peut donner naissance à une série de franges très brillantes que l'on verra apparaître sur le miroir M au plus léger voile de rosée.

Pour saisir avec précision le moment où ces franges se produisent, on devra observer le miroir avec une lunette que l'on aura réglée pour voir nettement par réflexion sur le miroir M, soit l'image d'une

Digitized by Google

ouverture rectiligne variable placée au foyer d'une lentille convergente (1), soit l'image de la fente lumineuse.

Remarque. — L'hygromètre de Daniell permet de faire expérimentalement la distinction entre les deux principes que nous avons exposés au début de ce chapitre, le principe de Leroy et le principe de Watt.

Lorsqu'on verse de l'éther sur la boule M on refroidit cette portion du tube. A l'intérieur du tube, en vertu du principe de Watt, il y a distillation du point le plus chaud au point le plus froid, c'est-à-dire que l'éther s'évaporant en V, vient distiller en M. Cette évaporation refroidit la boule V et la paroi extérieure. Nous avons donc, au dehors du tube, le cas, de la paroi refroidie dans un espace illimité. C'est le cas où le principe de Leroy va s'appliquer et nous aurons condensation lorsque la température sera devenue celle pour laquelle la force élastique f devient maxima.

PSYCHROMÈTRE (*fig. 115*)

L'appareil se compose de deux thermomètres T et T′ montés côte à côte sur un pied commun. L'un, T, donne la température de l'air ambiant.

L'autre T′ a son réservoir entouré d'une mèche de coton qui communique avec un réservoir R contenant de l'eau.

Pour déterminer l'état hygrométrique au moyen de cet appareil, on active l'évaporation de l'eau, et lorsque le thermomètre mouillé demeure stationnaire, on lit les indications T et t des deux thermomètres. Appelant f la force élastique de la vapeur d'eau contenue dans l'air au moment de l'expérience, f' la force élastique maxima de la vapeur d'eau à la température t, on applique la formule

$$f = f' - AH(T - t),$$

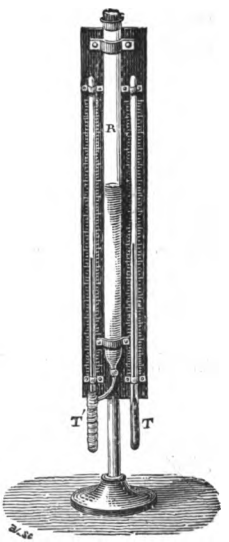


Fig. 115

(1) L'expérience a montré que l'on peut compter d'une façon absolue sur l'exactitude des résultats que l'on obtient avec cet appareil.

Digitized by Google

H étant la pression barométrique au moment de l'expérience, A une constante de l'appareil.

Ayant déterminé f, on cherche dans les tables la force élastique F correspondant à la température T ; l'état hygrométrique est alors donné par

$$e = \frac{f}{F}.$$

DÉTERMINATION DE LA CONSTANTE A

Explication de la formule

Lorsque le thermomètre mouillé reste stationnaire, il y a égalité entre la quantité de chaleur gagnée par le rayonnement des corps environnants et la quantité de chaleur perdue par évaporation. Cette dernière est proportionnelle à la différence $f' - f$ entre la force élastique maxima à t^o et la force élastique actuelle et inversement proportionnelle à la pression H.

Elle peut donc s'exprimer par

$$B\frac{f' - f}{H},$$

B étant un coefficient de proportionnalité. La chaleur gagnée est d'ailleurs proportionnelle à la différence $T - t$ (si cette différence n'est pas trop grande). Elle peut, par suite, se représenter par

$$C(T - t),$$

C étant un second coefficient de proportionnalité. On a donc :

$$B\frac{f' - f}{H} = C(T - t),$$

d'où

$$f' - f = \frac{C}{B} \cdot H(T - t),$$

ou en posant

$$\frac{C}{B} = A$$

$$f = f' - AH(T - t).$$

Digitized by Google

Mode opératoire

On lit les indications des deux thermomètres T et t. On observe H au baromètre.

Les tables de forces élastiques donnent f'. Une observation préalable avec un hygromètre fait connaître f. On en tire

$$A = \frac{f' - f}{H(T - t)}.$$

Exemple numérique :

$T = 18°,4.$
$t = 9°,6.$
$M = 760.$
$f' = 8,9.$
$f = 3,7.$

On a :

$$A = \frac{8,9 - 3,7}{750(18°,4 - 9°,6)} = 0,00079.$$

Remarque.— Des expériences de M. Macé de Lépinay ont montré que A était sensiblement constant lorsque le renouvellement de l'air était très rapide. Il y a donc avantage à faire tourner rapidement le thermomètre humide en l'attachant avec une ficelle. Pour le *psychromètre fronde* ainsi constitué, on trouve en moyenne $A = 0,00069$.

Digitized by Google

Force élastique de la vapeur d'eau suivant Regnault

Températures	TENSIONS en millimètres de mercure	Températures	TENSIONS en millimètres de mercure	Températures	TENSIONS en millimètres de mercure
— 32°	0,32	17	14,42	66	195,50
31	0,35	18	15,36	67	204,38
30	0,39	19	16,35	68	213,60
29	0,42	20	17,39	69	223,17
28	0,46	21	18,49	70	233,09
27	0,50	22	19,66	71	243,39
26	0,55	23	20,89	72	254,07
25	0,60	24	22,18	73	265,15
24	0,66	25	23,55	74	276,62
23	0,72	26	24,99	75	288,52
22	0,78	27	26,51	76	300,84
21	0,85	28	28,10	77	313,60
20	0,93	29	29,78	78	326,80
19	1,01	30	31,55	79	340,49
18	1,09	31	33,41	80	354,64
17	1,19	32	35,36	81	369,29
16	1,29	33	37,41	82	384,44
15	1,40	34	39,57	83	400,10
14	1,52	35	41,83	84	416,30
13	1,65	36	44,20	85	433,04
12	1,78	37	46,69	86	450,34
11	1,93	38	49,30	87	468,22
10	2,09	39	52,04	88	486,69
9	2,27	40	54,91	89	505,76
8	2,46	41	57,91	90	525,45
7	2,66	42	61,06	91	545,78
6	2,88	43	64,35	92	566,76
5	3,11	44	67,79	93	588,41
4	3,37	45	71,39	94	610,74
3	3,64	46	75,16	95	633,78
2	3,94	47	79,01	96	657,54
— 1	4,26	48	83,20	97	682,03
0	4,60	49	87,50	98	707,26
+ 1	4,94	50	91,98	99	733,21
2	5,30	51	96,66	100	760,00
3	5,69	52	101,54	110	1070,37
4	6,10	53	106,64	120	1491,28
5	6,53	54	111,95	130	2030,28
6	7,00	55	117,48	140	2717,6
7	7,49	56	123,24	150	3581,2
8	8,02	57	129,25	160	4651,6
9	8,57	58	135,51	170	5961,7
10	9,16	59	142,02	180	7546,4
11	9,79	60	148,79	190	9442,7
12	10,46	61	155,84	200	11689,0
13	11,16	62	163,17	210	14324,8
14	11,91	63	170,79	220	17390,4
15	12,70	64	178,71	230	20926,4
16	13,54	65	186,95		

Digitized by Google

TABLE DES FORCES ÉLASTIQUES MAXIMA DE LA VAPEUR D'EAU

Pour les températures comprises entre — 10° et + 40° par cinquièmes de degrés.

Températures	Millimètres	Températures	Millimètres	Températures	Millimètres
— 10,0	2,090	— 4,0	3,370	+ 2,0	5,300
8	2,119	8	3,420	2	5,380
6	2,155	6	3,472	4	5,455
5	2,175	5	3,501	5	5,490
4	2,195	4	3,530	6	5,530
2	2,230	2	3,582	8	5,605
— 9,0	2,270	— 3,0	3,640	+ 3,0	5,690
8	2,308	8	3,695	2	5,765
6	2,349	6	3,757	4	5,850
5	2,362	5	3,789	5	5,890
4	2,382	4	3,820	6	5,935
2	2,422	2	3,880	8	6,020
— 8,0	2,460	— 2,0	3,940	+ 4,0	6,100
8	2,500	8	4,000	2	6,185
6	2,537	6	4,065	4	6,272
5	2,549	5	4,095	5	6,310
4	2,579	4	4,130	6	6,358
2	2,620	2	4,192	8	6,448
— 7,0	2,660	— 1,0	4,260	+ 5,0	6,530
8	2,701	8	4,330	2	6,621
6	2,748	6	4,397	4	6,666
5	2,769	5	4,430	5	6,760
4	2,792	4	4,462	6	6,805
2	2,837	— 0,2	4,531	8	6,901
— 6,0	2,880	+ 0,0	4,600	+ 6,0	7,000
8	2,923	2	4,670	2	7,085
6	2,970	4	4,735	4	7,187
5	2,992	5	4,770	5	7,240
4	3,015	6	4,805	6	7,290
— 5,2	3,061	8	4,870	8	7,387
0	3,110	+ 1,0	4,940	+ 7,0	7,490
8	3,160	2	5,014	2	7,590
6	3,211	4	5,089	4	7,698
5	3,235	5	5,120	5	7,750
4	3,261	6	5,155	6	7,795
2	3,315	8	5,231	8	7,899

Digitized by Google

Températures	Millimètres	Températures	Millimètres	Températures	Millimètres
+ 8,0	8,020	+ 16,0	13,630	+ 24,0	22,180
2	8,125	2	13,760	2	22,450
4	8,235	4	13,907	4	22,720
5	8,290	5	13,970	5	22,860
6	8,340	6	14,075	6	22,993
8	8,500	8	14,250	8	23,280
+ 9,0	8,570	+ 17,0	14,420	+ 25,0	23,550
2	8,675	2	14,612	2	23,832
4	8,799	4	14,800	4	24,115
5	8,860	5	14,880	5	24,260
6	8,911	6	14,982	6	24,402
8	9,035	8	15,220	8	24,693
+ 10,0	9,160	+ 18,0	15,360	+ 26,0	24,990
2	9,285	2	15,552	2	25,277
4	9,410	4	15,752	4	25,590
5	9,470	5	15,840	5	25,740
6	9,535	6	15,945	6	25,881
8	9,660	8	16,150	8	26,190
+ 11,0	9,790	+ 19,0	16,340	+ 27,0	26,500
2	9,925	2	16,570	2	26,820
4	10,060	4	16,765	4	27,132
5	10,120	5	16,860	5	27,290
6	10,200	6	16,960	6	27,450
8	10,330	8	17,185	8	27,770
+ 12,0	10,460	+ 20,0	17,390	+ 28,0	28,100
2	10,600	2	17,620	2	28,422
4	10,735	4	17,840	4	28,762
5	10,800	5	17,930	5	28,930
6	10,855	6	18,055	6	29,100
8	10,965	8	18,282	8	29,440
+ 13,0	11,060	+ 21,0	18,490	+ 29,0	29,780
2	11,236	2	18,727	2	29,130
4	11,420	4	18,960	4	29,475
5	11,530	5	19,070	5	29,650
6	11,605	6	19,200	6	29,830
8	11,755	8	19,440	8	31,195
+ 14,0	11,910	+ 22,0	19,660	+ 30,0	31,550
2	12,062	2	19,900	2	31,902
4	12,220	4	20,149	4	32,285
5	12,300	5	20,260	5	32,460
6	12,365	6	20,400	6	32,660
8	12,527	8	20,650	8	33,035
+ 15,0	12,700	+ 23,0	20,890	+ 31,0	33,400
2	12,850	2	21,145	2	33,780
4	13,025	4	21,402	4	34,172
5	13,110	5	21,530	5	34,370
6	13,205	6	21,655	6	34,550
8	13,400	8	21,915	8	34,965

Digitized by Google

Températures	Millimètres	Températures	Millimètres	Températures	Millimètres
+ 32,0	35,360	+ 34,8	41,385	+ 37,5	48,000
2	35,780	+ 35,0	41,830	6	48,230
4	36,175	2	42,310	8	48,750
5	36,370	4	42,790	+ 38,0	49,300
6	36,592	5	43,010	2	49,810
8	37,002	6	43,240	4	50,380
+ 33,0	37,410	8	43,740	5	50,670
2	37,835	+ 36,0	44,200	6	50,900
4	38,270	2	44,725	8	51,450
5	38,470	4	45,210	+ 39,0	52,040
6	38,700	5	45,440	2	52,580
8	39,135	6	45,692	4	53,160
+ 34,0	39,560	8	46,210	5	53,470
2	40,025	+ 37,0	46,690	6	53,740
4	40,465	2	47,190	8	54,310
5	40,680	4	47,725	+ 40,0	54,900
6	40,900				

Digitized by Google

OPTIQUE

PHOTOMÉTRIE

Considérons une source lumineuse quelconque, soit, par exemple, une bougie placée devant un écran. Elle produit sur cet écran un certain éclairement.

Prenons maintenant une seconde source lumineuse constituée par la réunion de quatre bougies identiques à la première. La théorie et l'expérience montrent que pour obtenir sur la même surface le même éclairement, il faut placer ce second système à une distance de l'écran double de la distance de cet écran à la première bougie.

Répétons l'expérience avec neuf bougies; il faudra les mettre à une distance de l'écran triple de celle de la première bougie, et ainsi de suite.

Si donc nous appelons I l'intensité lumineuse d'une bougie, D sa distance à l'écran :

L'intensité des quatre bougies sera représentée par 4 I.
La distance des quatre — — 2 D.
L'intensité des neuf — — 9 I.
La distance des neuf — — 3 D, etc.

On voit donc que lorsque les distances deviennent 1, 2, 3, 4 fois plus grandes, il faut, pour produire le même éclairement, des intensités 4, 9, 16 fois plus grandes.

D'une façon générale, si I et I′ sont les intensités lumineuses de deux sources S et S′, D et D′ leurs distances respectives à l'écran sur lequel elles produisent des éclairements égaux, on a la relation

$$\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}.$$

Exemple. — Supposons que S soit une bougie et S′ une lampe carcel et supposons que pour obtenir l'égalité d'éclairement, on

Digitized by Google

soit obligé de mettre la bougie à 2 mètres et la lampe à 8 mètres de l'écran. On aura :

$$\frac{\text{I (bougie)}}{\text{I' (carcel)}} = \frac{2^2}{8^2} = \frac{4}{64} = \frac{1}{16}.$$

ou $I' = 16\ I$.

Cette formule est le principe des différentes méthodes photométriques.

Nous emploierons les photomètres le plus habituellement usités dans les laboratoires de physique.

Photomètre de Foucault

Dans ce photomètre, qui n'est qu'une modification du photomètre de Bouguer, les deux sources L_1 et L_2 sont placées de part et d'autre d'une paroi mobile que l'on voit en D (*fig. 116*)

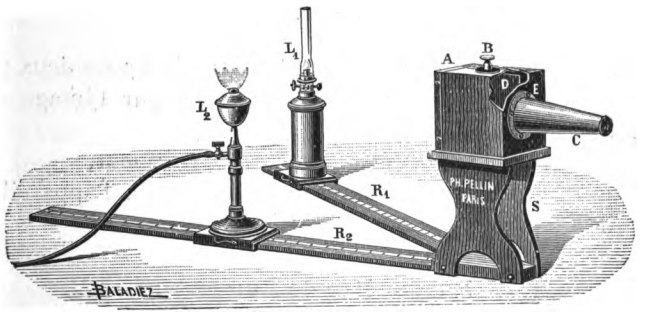


Fig. 116

et éclairent un écran E constitué par une lame de verre amidonnée. On déplace la paroi D au moyen du bouton B jusqu'à ce que les deux plaques éclairées soient en contact, ce qui est toujours une bonne condition d'observation. Laissant alors l'une des sources immobile, on déplace l'autre jusqu'à obtenir l'égalité d'éclairement. Des règles divisées R_1 et R_2 permettent alors de mesurer les distances D_1 et D_2. On n'a plus qu'à appliquer la formule indiquée plus haut.

Photomètre de Bunsen

Un écran de papier porte en son milieu une petite tache que l'on a produite en touchant le papier avec un bâton de verre trempé dans la paraffine fondue.

Digitized by Google

Les deux sources à comparer sont placées de part et d'autre de cet écran et l'on déplace l'une des deux jusqu'à ce que la tache ne se distingue plus du reste de l'écran. Il est commode pour

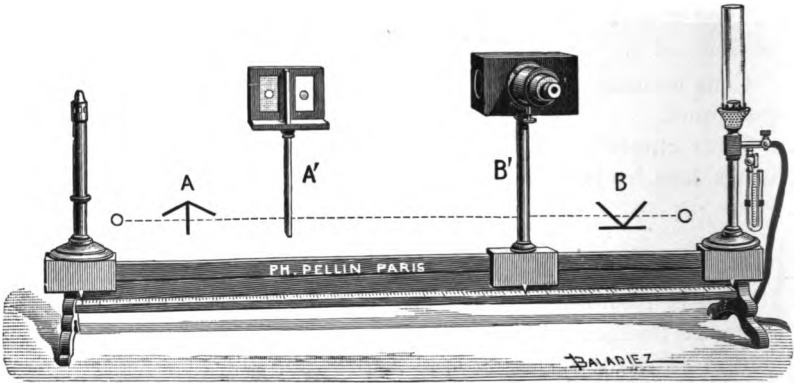


Fig. 117

l'observation de disposer comme l'indique la figure deux petits miroirs à 45° (A) qui renvoient à l'observateur l'image de la tache.

Les distances se mesurent comme précédemment.

La figure 117 montre la disposition donnée à l'appareil par M. Violle.

Photomètre de Rumfort

Le plus facile à réaliser, car il se compose d'une plaque de verre amidonnée ou plus simplement encore d'un écran de papier ou de toile E et d'une tige verticale T.

Les deux sources L et B projettent sur l'écran deux ombres *a* et *b* de la tige T. On observe ces deux ombres par transparence.

On déplace l'une des sources jusqu'à rapprocher d'abord les deux ombres et ensuite de façon à obtenir l'égalité d'éclairement de ces deux ombres.

On mesure alors la distance D_1 de la source L à *l'ombre portée par la source* B et la distance D_2 de la source B à *l'ombre portée par la source* L. On applique ensuite la formule citée plus haut.

Remarque. — Les méthodes précédentes sont d'une application facile lorsque l'on a des sources également colorées. Il n'en

Digitized by Google

est plus de même lorsque les teintes diffèrent; quand, par exemple, on veut comparer les intensités d'un bec de gaz et d'une lampe à arc électrique.

Un moyen simple que l'on emploie, pour avoir une certaine approximation, est d'interposer sur le trajet des deux faisceaux lumineux des verres également colorés.

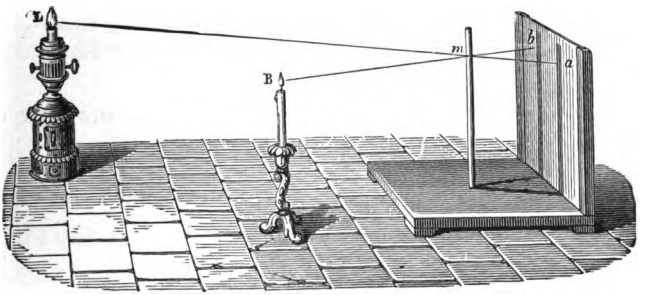


Fig. 118

Une mesure plus précise est obtenue en analysant chacune des deux lumières et comparant les rayons de même réfrangibilité (Voir *Analyse spectrale*). C'est la méthode du spectrophotomètre de M. Violle.

Unités photométriques

Le premier étalon photométrique fut la bougie employée par Bouguer, et qui, malgré son peu de constance et d'intensité, fut suffisante, tant qu'on n'eût pas à mesurer de grandes intensités. En 1861, Dumas et Boussingault adoptèrent la lampe carcel, brûlant 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure. C'est encore l'unité employée par la Compagnie du gaz.

M. Vernon-Harcourt, de Londres, a cherché à produire un gaz de composition constante en utilisant, comme combustible, de l'air carburé par des carbures d'hydrogène volatiles extraits du pétrole

Mentionnons également la lampe d'acétate d'amyle de M. Hefner, d'une constance très satisfaisante, mais d'une intensité très faible.

Tous ces étalons n'étaient plus suffisants lorsque l'on eût à mesurer des intensités un peu grandes. Déjà, en 1844, Draper prenait un fil de platine parcouru par un courant électrique. Cette idée fut reprise en 1878 par Schwendler à Calcutta. Enfin,

Digitized by Google

en 1883, M. Violle faisait adopter l'unité qu'il avait construite et qui est prise actuellement comme unité absolue.

Pour reproduire cet étalon Violle, on considère l'intensité fournie par un centimètre carré de platine à sa température de fusion (1700°).

L'étalon Violle admet comme sous-multiple la bougie décimale, qui en est le vingtième. La lampe carcel vaut 0,481 Violle. L'unité d'éclairement est l'éclairement produit par cette unité sur une surface placée normalement aux rayons lumineux et à un centimètre de distance.

L'éclairement E produit sur une surface par une source d'intensité I à une distance D, est donné par $E = \frac{I}{D^2}$.

Si on désigne par *s* la surface de la source, par I son intensité, on appelle *éclat intrinsèque* le quotient $\frac{I}{s}$, c'est-à-dire l'intensité de la source par unité de surface.

MESURE DES DISTANCES FOCALES DES MIROIRS ET DES LENTILLES

Nous rappellerons à ce propos quelques définitions indispensables.

On appelle foyer d'un miroir ou d'une lentille le point où viennent converger, réellement ou virtuellement les rayons venant de l'infini, après réflexion dans le cas des miroirs, après réfraction dans le cas des lentilles.

Deux points lumineux sont dits conjugués par rapport à un système optique quelconque, miroir ou lentille, lorsque l'image de l'un fournie par le système optique coïncide avec l'autre et réciproquement.

On commencera, comme étude expérimentale, par former les images d'une source lumineuse quelconque, une bougie, par exemple.

1° *Miroir concave.* — L'objet étant très loin du miroir, l'image est au foyer ou très sensiblement en ce point. Elle est renversée et plus petite que l'objet.

L'objet se rapprochant du centre, l'image s'en rapproche également, et devient égale à l'objet lorsque celui-ci est au centre.

Digitized by Google

L'objet dépassant le centre et se rapprochant du foyer, l'image reprend les positions précédemment occupées par l'objet. Elle est encore renversée et plus grande que l'objet.

L'objet étant au foyer, l'image est rejetée à l'infini. L'objet se déplaçant entre le foyer et le miroir, l'image est virtuelle droite et plus grande que l'objet.

Appelons p la distance de l'objet au miroir, p' la distance de l'image au miroir, f la distance du foyer au miroir, on a la relation

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

d'où

$$f = \frac{pp'}{p + p'}.$$

Exemple.

$p = 45^{cm}$ $p' = 10^{cm}$,

$$f = \frac{45 \times 10}{45 + 10} = \frac{450}{55} = \frac{90}{11} = 8^{cm},1818 —$$

2° *Miroir convexe.* — On vérifie que l'image d'un objet réel est virtuelle.

Pour mesurer la distance focale, on se sert d'un écran présentant deux petits trous A A'. On dirige sur le miroir un faisceau de lumière parallèle.

L'écran ne laisse passer que deux petits pinceaux A I, A' I', qui se réfléchissent comme s'ils venaient du foyer virtuel F et viennent peindre sur l'écran deux taches lumineuses R et R'.

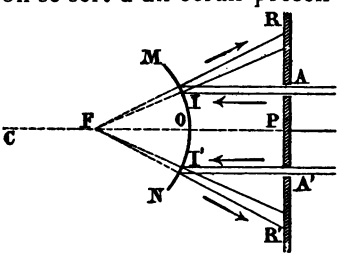


Fig. 119

On déplace l'écran de façon que la longueur A A' soit double de la longueur R R' La distance de l'écran au miroir mesure alors sensiblement la distance focale cherchée (*fig. 119*).

Lentille convergente. — On constatera, comme pour le miroir concave, que lorsque l'objet est très loin, l'image se forme pratiquement au foyer.

Digitized by Google

Quand l'objet se rapproche de la lentille, l'image s'éloigne et devient égale à l'objet et est placée symétriquement par rapport à la lentille, quand l'objet est à une distance de la lentille double de la distance focale. Cette remarque justifie l'emploi du focomètre de Silbermann (Voir plus loin).

Dans toute autre position, on applique la formule :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f} \qquad \text{d'où } f=\frac{pp'}{p+p'}.$$

Lentille divergente. — Pour déterminer la distance focale, on couvre la lentille de l'écran que nous avons précédemment employé pour le miroir convexe. On dirige sur la lentille un faisceau de lumière parallèle et on cherche où l'on doit mettre un écran H pour que les faisceaux réfractés A'*a*, B'*b* donnent des images *a* et *b*, dont l'écartement soit double de celui de A et B (*fig.* 120).

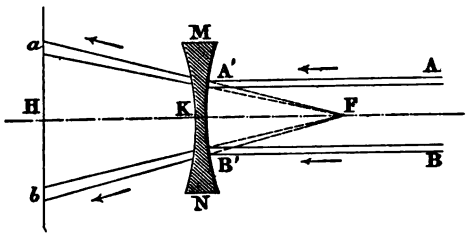


Fig. 120

La distance *a* de l'écran à la lentille est alors la distance focale cherchée.

Autre méthode. — On peut encore accoupler à la lentille divergente une lentille convergente dont la distance focale f soit telle que le système soit convergent. (Il faut pour cela que f soit plus petit que la distance focale de la lentille divergente.) On mesure, comme nous l'avons montré précédemment, la distance focale du système convergent ainsi constitué et l'on calcule f' (distance focale cherchée) par la formule

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f}-\frac{1}{f'}.$$

Focomètre de Silbermann

Cet appareil est formé d'un support que l'on fixe sur le banc d'optique et dans lequel l'on monte la lentille à essayer, deux autres supports, mobiles sur le banc d'optique, portent deux dia-

Digitized by Google

phragmes en verre dépoli encaissés dans des bonnettes et portant une division opaque parfaitement identique, l'un sur sa moitié supérieure, l'autre sur sa moitié inférieure. On éclaire l'un d'eux avec une lampe et on observe l'autre avec une loupe.

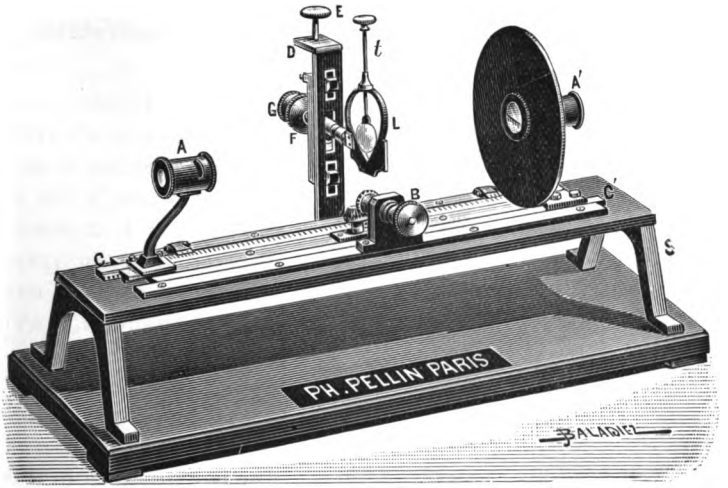


Fig. 121

Une vis de rappel qui commande à la fois les deux bonnettes permet de les écarter symétriquement de la lentille. Lorsque l'image d'un des diaphragmes est venue se superposer à l'autre, la distance des deux diaphragmes est égale à $4f$, f étant la distance focale de la lentille.

La figure 121 montre la disposition donnée à l'appareil par M. Pellin.

La lentille se place en L, A et A′ sont les bonnettes contenant les diaphragmes.

Emploi du sphéromètre

Dans un miroir, la distance focale est égale à la moitié du rayon de la sphère auquel il appartient.

Dans les lentilles, on a, en appelant R et R les rayons de deux calottes sphériques et n l'indice de réfraction (voir plus loin) de la substance qui forme les lentilles.

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right).$$

Digitized by Google

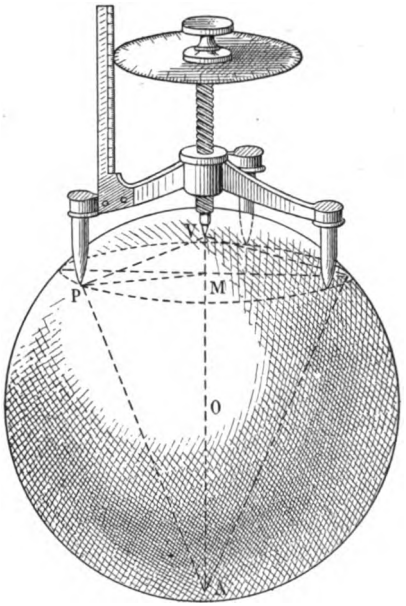


Fig. 122

On peut donc ramener la détermination des distances focales à la mesure du rayon d'une sphère.

Mode opératoire

On place le sphéromètre sur la portion de sphère dont on cherche le rayon et l'on descend la vis jusqu'à assurer le contact en observant les prescriptions indiquées dans l'usage du sphéromètre. (Voir page 17).

On note la position de la vis. On reporte le sphéromètre sur un plan. On note la hauteur dont il faut faire descendre la vis. Soit f cette hauteur.

Soit a le rayon du cercle qui passerait par les trois pointes du sphéromètre. Le rayon de la sphère considérée est donné par

$$R = \frac{a^2 + f^2}{2f} \qquad (1)$$

ÉTUDE DES OCULAIRES

On appelle *oculaires positifs* ceux qui sont destinés à regarder des objets réels. Ils sont tous convergents, à l'exception des besicles de myopes, qui sont divergents.

On appelle *oculaires négatifs* ceux qui sont destinés à regarder

---

(1) On a, en effet, dans la sphère O, $PM^2 = VM \times MA$,

ou $a^2 = f(2R - f)$

$$2R = \frac{a^2 + f^2}{f} \qquad R = \frac{a^2 + f^2}{2f}.$$

(*fig. 122*)

Digitized by Google

des objets virtuels. Les uns, comme l'oculaire d'Huyghens, sont convergents; les autres, comme l'oculaire de la lunette de Galilée, sont divergents.

Puissance d'un oculaire

On appelle *puissance* d'un oculaire l'angle sous lequel on voit, au travers de cet oculaire, l'unité de longueur. On démontre facilement que, pratiquement, la puissance d'un oculaire est égale à sa convergence (dans le cas de l'œil normal).

$$P = \frac{1}{f}.$$

Grossissement d'un oculaire

C'est le produit de la puissance par la distance minima de vision distincte D,

$$G = P \times D = \frac{D}{f}.$$

Oculaire de Ramsden

Formé de deux lentilles plan-convexes de même distance focale f dont la distance est $\frac{2}{3}f$ et qui se regardent par leurs faces convexes

$$P = \frac{4}{3}f.$$

Oculaire d'Huygens

Deux lentilles plan-convexes tournant leurs faces planes du côté de l'œil.

Appelons f et f' les distances focales et d la distance des deux lentilles. On a :

$$f = 3f' \text{ et } d = 2f'.$$

Dans ce cas

$$P = \frac{2}{3}f'.$$

Digitized by Google

Puissance du microscope composé

C'est le produit du grossissement de l'objectif par la puissance de l'oculaire

$$P = \frac{l - f}{f F}.$$

f étant la division focale de l'objectif.
F — — de l'oculaire.
l la distance des deux verres.
Pour le grossissement, on trouve de même

$$G = \frac{l - f}{F f} \cdot \frac{1}{D},$$

D étant la distance minima de vision distincte.

Mesure du grossissement d'un microscope au moyen de la chambre claire

Fig. 123

Pour mesurer le grossissement d'un microscope, on se sert d'une chambre claire, représentée à part (*fig. 125 et 126*) et qui s'adapte sur le tube oculaire A.

On prend comme objet un micromètre, c'est-à-dire une division très fine généralement en centièmes de millimètre, que l'on place sur le porte-objet.

A côté du microscope on place une réglette divisée en millimètres et l'on s'arrange en modifiant la position de la réglette, de façon à voir se superposer l'image du micromètre et celle de la réglette. La figure 127 montre la marche des rayons dans ce cas.

Lorsque cette coïncidence est établie, on évalue le nombre M de divisions de

Digitized by Google

la réglette couvertes par une division grossie du micromètre ou

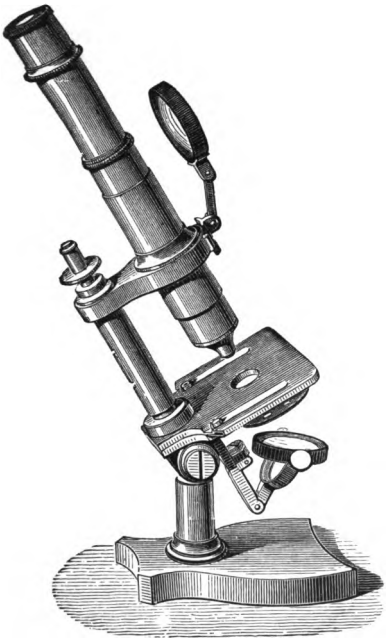


Fig. 124

Fig. 125

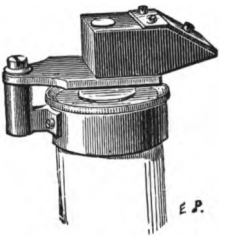


Fig. 126

plus généralement par N divisions grossies de micromètre. Dans le cas où les divisions ont les valeurs que nous leur avons attribuées, le grossissement est mesuré par le nombre $\frac{100\ M}{N}$.

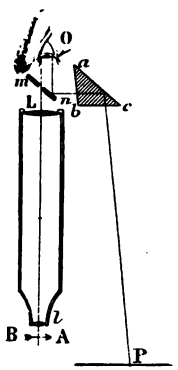


Fig. 127

Exemple. — Supposons que quatre divisions grossies du micromètre couvrent exactement 6 millimètres. Le grossissement sera :

$$\frac{100 \times 6}{4} = 150.$$

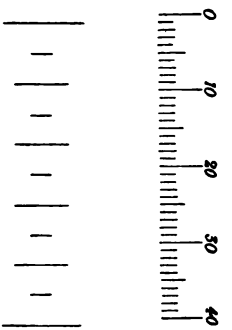


Fig. 128

Remarque. — Il est quelquefois assez difficile de mettre au point en même temps les deux échelles divisées et de les voir

Digitized by Google

toutes deux distinctement. On opérera plus facilement en marquant sur une feuille de papier, avec la pointe d'un crayon, l'image de deux traits déterminés du micromètre. Il sera facile ensuite de mesurer très exactement la distance des deux traits ainsi obtenus.

Mesure du grossissement d'une lunette par le dynamètre de Ramsden

Lorsqu'une lunette est dirigée vers une partie du ciel vivement éclairée, il se forme au-delà de l'oculaire une image de l'objectif qui peut être reçue sur un écran et à laquelle on a donné le nom d'anneau oculaire. Comme écran on se sert d'une plaque translucide *a b* montée dans un tube T et portant une division au dixième de millimètre.

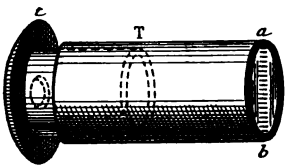


Fig. 129

On place cet appareil, qui constitue le dynamètre de Ramsden de façon à ce que l'image de l'anneau oculaire vienne se former bien nettement sur *a b*. On observe d'ailleurs cette image au moyen d'une loupe L montée dans un tube à tirage. On note le diamètre de cet anneau oculaire.

Ceci fait, on déplace les deux pointes d'un compas à la surface de l'objectif et l'on fait en sorte que l'on voie leurs images coïncider avec les extrémités d'un diamètre de l'anneau oculaire. En divisant la distance de deux pointes par le diamètre de l'anneau, on obtient le grossissement cherché.

Méthode directe. — Chambre claire de Pouillet. — On peut employer aussi une chambre claire due à Pouillet et dont la figure 130 marque la disposition.

Le mode opératoire est analogue à celui relatif à la mesure du grossissement du microscope. On vise à la fois, directement et par la lunette, une échelle divisée. Le grossissement s'évalue ainsi directement.

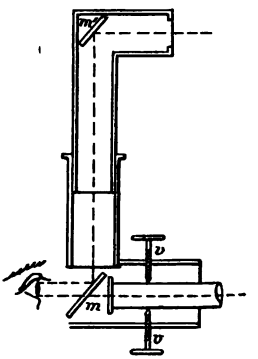


Fig. 130

Digitized by Google

GONIOMÉTRIE

GONIOMÈTRE DE WOLLASTON

Le goniomètre de Wollaston sert à mesurer les angles dièdres de très petits cristaux.

Il est composé d'un cercle C (*fig. 131*) divisé sur son champ en demi-degrés et qui peut tourner dans un plan vertical devant un double vernier V donnant directement dans un sens ou dans l'autre l'angle cherché en degrés et minutes.

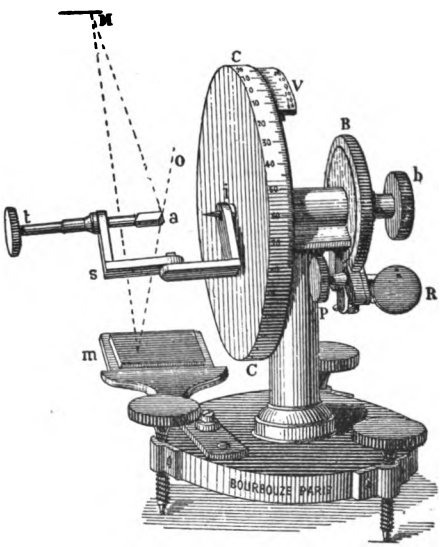


Fig. 131

L'axe sur lequel est fixé ce cercle gradué est percé dans toute sa longueur de façon à pouvoir laisser tourner librement et indépendamment du cercle gradué, un autre petit axe *i* dont l'extrémité saillante porte un support S articulé à mouvements rectangulaires. Sur le côté opposé de ce support est ajusté un tube dans lequel peut glisser à frottement doux une tige *t* à l'extrémité de laquelle on fixe avec de la cire molle, le cristal dont on veut mesurer les angles.

Digitized by Google

Un petit miroir *m* disposé sur le pied de l'instrument permet de n'employer qu'une seule mire pour régler les faces du cristal et par suite les angles dièdres, dans une position parfaitement déterminée.

Enfin une pince à bouton P de serrage sert à immobiliser le cercle et à déterminer avec précision les différentes coïncidences.

Mode opératoire

Fixer le cristal à l'extrémité de la tige *t* avec de la cire molle. Mettre le zéro du limbe en coïncidence approchée avec le zéro du vernier. Serrer la vis de pression P de manière à immobiliser le cercle et amener les traits *o* à la parfaite coïncidence à l'aide de la vis de rappel R. Disposer le cercle dans un plan perpendiculaire à la ligne horizontale qui doit servir de mire. Placer l'œil tout près du cristal. Regarder la mire par réflexion sur une de ses faces. Tourner ensuite celle-ci de manière, que la mire, ainsi réfléchie, coïncide avec l'image de cette dernière vue par réflexion sur le miroir *m*. Quand on a ainsi obtenu cette première coïncidence, on fait tourner le petit axe intérieur *i* jusqu'à ce que la même coïncidence s'observe sur l'autre face dont on veut mesurer l'angle avec la première. Lorsqu'on est parvenu à établir, par la seule rotation du petit axe *i* la coïncidence de l'image de la mire sur le miroir avec celles successivement réfléchies sur les deux faces du cristal, on est certain que l'intersection des deux surfaces est parallèle à l'axe de l'instrument.

Mesure de l'angle

Après s'être assuré que le zéro du vernier coïncide bien avec celui du limbe, on amène, avec le bouton *t* du petit axe, une des faces dans une position telle que l'image de la mire sur cette première surface coïncide avec celle du miroir.

Cette première position bien déterminée ; on desserre le bouton de la vis de rappel, puis on fait tourner le limbe jusqu'à ce que la réflexion et la coïncidence de la même mire sur cette seconde face du cristal se fassent comme pour la première.

Digitized by Google

La lecture se fait en degrés et minutes à l'aide du vernier.

L'arc parcouru par le limbe sera le supplément de l'arc qui mesure l'angle dièdre cherché.

En effet, soit *i* le rayon incident (*fig. 132*) et *r* le rayon réfléchi.

L'angle *n g n'*, dont la valeur est donnée en degrés et minutes

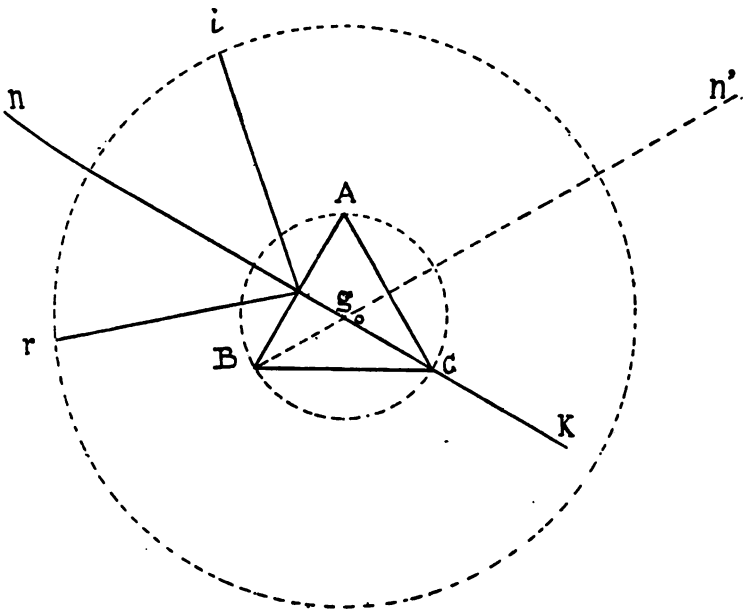


Fig. 132

par le vernier, sera le supplément de l'angle dièdre A qui est égal à l'angle *n'o*K, donc en retranchant de 180° l'angle mesuré *n g n'*, l'angle *n'o*K sera évidemment égal à l'angle dièdre cherché.

Si, par exemple, il a fallu faire parcourir au zéro du limbe un arc de 74°34′ le supplément de cet angle sera égal à 179° 60′ — 74° 34′, c'est-à-dire 105° 26′ pour la valeur de l'angle cherché.

N.-B. — Il est à remarquer que le cercle divisé en demi-degrés est chiffré en degrés pour la commodité de la lecture. Il en résulte que, si dans la lecture d'angle, le zéro du vernier a dépassé un demi-degré, il faut ajouter 30 minutes à la lecture de l'angle mesuré.

Digitized by Google

MESURE DES ANGLES

Par le Goniomètre de Babinet

Description de l'appareil. — Le goniomètre de Babinet se compose d'un cercle horizontal dont le limbe est divisé en demi-degrés et sur lequel se déplacent trois alidades dont deux sont munies de verniers.

Ces alidades peuvent être fixées au limbe au moyen d'une vis de pression; une vis de rappel permet de donner à chaque alidade des déplacements très petits.

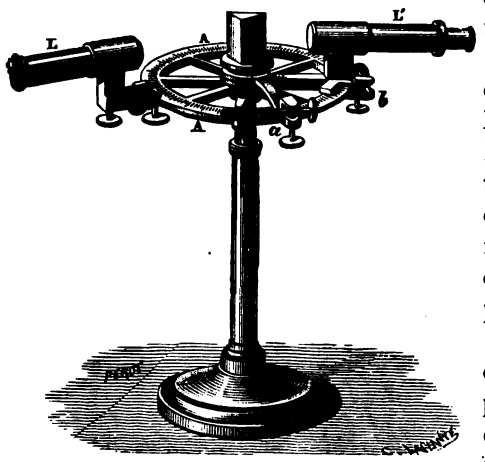


Fig. 133

L'une de ces alidades, porte une petite lunette astronomique L', à réticule, réglée de telle sorte que son axe optique soit dans la direction d'un rayon du cercle et parfaitement parallèle à son plan.

La seconde *a* fait corps avec une petite plate-forme P sur laquelle on installera le prisme à mesurer et qui doit occuper exactement le centre du cercle horizontal.

La troisième, qui ne porte pas de vernier, supporte le collimateur L. C'est un tube terminé par une fente F, dont la largeur peut être réglée au moyen d'une vis, et qui est placée au foyer d'une lentille. On éclaire la fente au moyen d'une source lumineuse quelconque, un bec de gaz, par exemple, et le collimateur ainsi constitué fournit un faisceau de rayons parallèles.

Mode opératoire

Réglage de l'Instrument. — On s'assure que la fente est

Digitized by Google

bien au foyer de la lentille. On règle l'ouverture de la fente de façon à lui donner une largeur de 1 millimètre au plus.

On amène la lunette L′ dans le prolongement du collimateur L. On déplace l'oculaire de façon à voir nettement le plan du réticule, puis ensuite l'objectif de façon à voir, dans le plan du réticule, l'image de la fente. On déplace la lunette au moyen de la vis de rappel jusqu'à ce que l'image de la fente soit coupée en son milieu par le fil vertical du réticule. Les axes optiques du collimateur et de la lunette sont alors dans le prolongement l'un de l'autre.

On place le prisme sur la plate-forme en l'assujettissant avec un peu de cire molle. Il faut s'assurer que l'arête du prisme est bien perpendiculaire à la plate-forme et par suite au plan du limbe. Dans certains goniomètres, la plate-forme est constituée par un miroir, et l'on s'arrange de façon que l'arête du prisme soit dans le prolongement de son image. Ce réglage suppose le miroir parallèle au plan du limbe.

Un réglage meilleur consiste à déplacer d'abord la lunette L′ de façon à viser par réflexion sur l'une des faces du prisme la fente lumineuse. On déplace le prisme, par de légères pressions, jusqu'à ce que cette image coïncide avec le réticule. On tourne ensuite la plate-forme, sans toucher à la lunette, de façon à amener la deuxième face du dièdre considéré à la place de la première. Si l'image de la fente coïncide encore avec le réticule le prisme a bien son arête perpendiculaire au plan du limbe.

Mesure de l'angle du prisme

La lunette étant dans une des positions de visée que nous venons de considérer, on fixe la plate-forme. On note la position du zéro du vernier de l'alidade de la lunette. On déplace celle-ci et on l'amène dans la position L′, de façon à voir, par réflexion sur la seconde face l'image de la fente.

L'angle dont on a ainsi fait tourner l'alidade A, est le double de l'angle α du prisme.

La figure *134* montre la marche des rayons réfléchis.

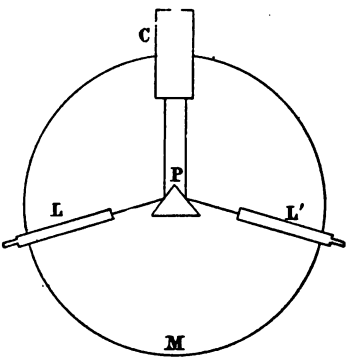


Fig. 134

Digitized by Google

Remarque. — En revenant à la position L, on fait une deuxième lecture de cette position, on peut ainsi déterminer plusieurs fois l'angle 2 α et prendre la moyenne.

Deuxième méthode. — On peut encore laisser la lunette immobile et déplacer l'alidade qui porte la plate-forme jusqu'à amener la seconde face du dièdre dans la position occupée précédemment par la première face (c'est-à-dire, bien entendu, jusqu'à faire coïncider avec le fil du réticule l'image de la fente donnée par la réflexion sur cette face). L'angle dont il a fallu faire tourner la plate-forme est le supplément de l'angle cherché.

Exemple. — Supposons que nous ayons fait tourner la plate-forme de 120° 25′, l'angle cherché est

$$\alpha = 180^\circ - 120^\circ 25' = 59^\circ 35'.$$

Comme vérification, on peut mesurer les angles. On doit trouver 180° comme somme.

Exemple :
$$\begin{aligned} \alpha &= 59^\circ 35' \\ \beta &= 95^\circ 4' \\ \gamma &= 25^\circ 21' \\ \alpha + \beta + \gamma &= 180^\circ 00. \end{aligned}$$

MESURE DES INDICES DE RÉFRACTION

On appelle réfraction la déviation qu'un rayon de lumière éprouve lorsqu'il passe, sous une incidence oblique, d'un milieu dans un autre.

Il y a entre la direction du rayon incident et celle du rayon dévié deux relations connues sous le nom de Lois de Descartes :

Ces lois sont exprimées de la manière suivante :

1° Le rayon incident et le rayon réfracté sont toujours compris dans un même plan normal à la surface de séparation des deux milieux.

2° Le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux.

Digitized by Google

Indice ou rapport de réfraction

Considérons un rayon de lumière qui passe de l'air dans l'eau. Le rayon I, en tombant en *o*, se réfracte, et, en se rapprochant de la normale D C, suit la direction O R. L'angle I O D est l'angle d'incidence, son sinus (I S) est le sinus d'incidence.

L'angle R O C est l'angle de réfraction *r*, son sinus (R S') est le sinus de réfraction (*fig. 135*).

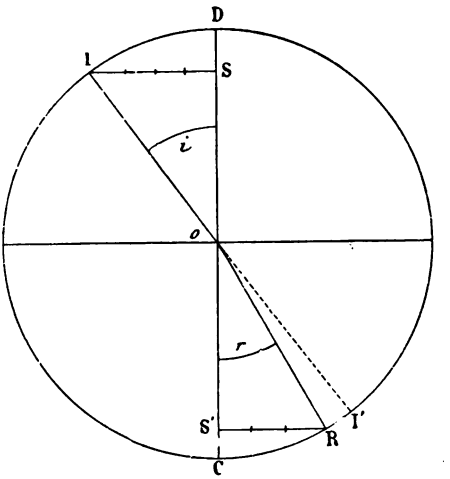


Fig. 135

Le rapport de ces deux sinus s'appelle indice de réfraction.

En désignant par *i* l'angle d'incidence, par *r* l'angle de réfraction et par *n* la valeur constante du rapport de leurs sinus, on aura la relation $\frac{\text{sin. } i}{\text{sin. } r} = n$, d'où sin. $i = n$ sin r,

Pour la lumière qui passe de l'air dans l'eau, comme le représente la figure 136, l'indice de réfraction *n* est égal à $\frac{4}{3}$; pour celle qui passe de l'air dans le verre, *n* est égal à $\frac{3}{2}$.

Loi de réciprocité

La lumière qui traverse un système de corps transparents suit toujours le même chemin, quel que soit le sens dans lequel elle se propage.

Si R devient rayon incident, le rayon incident primitif devient rayon réfracté et suit, d'après la loi énoncée ci-dessus, les mêmes directions, mais dans un ordre inverse, d'où il résulte qu'en passant de l'air dans l'eau la valeur de l'indice de réfraction sera $\frac{3}{4}$ et $\frac{2}{3}$ pour celle qui passe du verre dans l'air. Cela posé, on

Digitized by Google

devra, d'une manière générale, prendre pour numérateur du rapport le sinus du plus grand des deux angles, de façon à ce que les nombres qui représenteront les indices de réfraction relatifs à deux milieux soient plus grands que l'unité.

La méthode la plus simple pour mesurer les indices de réfraction des corps que l'on peut obtenir sous forme prismatique est la méthode dite de la déviation minimum.

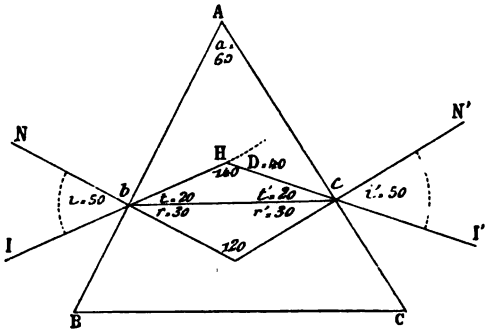


Fig. 136

On appelle angle de déviation l'angle que fait le rayon émergent avec le prolongement de rayon incident. Le calcul et l'expérience montrent que cette déviation est minimum lorsque les angles d'incidence et d'émergence sont égaux. En appelant A l'angle réfringent du prisme, D la déviation minimum observée, la théorie du prisme montre que l'indice de réfraction est donné par la formule

$$n = \frac{\text{Sin.}\ \frac{A + D}{2}}{\text{Sin.}\ \frac{A}{2}}.$$

Exemple. — Soient :

$$A = 60°$$
$$D = 40°$$
$$\frac{A + D}{2} = 50°$$

$$\frac{A}{2} = 30$$

$$n = \frac{\text{Sin. } 50}{\text{Sin. } 30} = 1.532$$

Digitized by Google

Mode opératoire

Nous avons déjà vu (page 195) comment on mesurait l'angle réfringent du prisme. La mesure de la déviation minimum se fait également au moyen du goniomètre de Babinet.

On commence par mettre le collimateur au zéro. On place la lunette dans le prolongement du collimateur. Nous supposerons que la fente et le réticule aient été réglés, comme nous l'avons indiqué précédemment, de façon que l'image de la fente soit exactement coupée en son milieu par le fil vertical du réticule. On note la position de la lunette, on installe le prisme sur la plate-forme centrale, de façon que la verticale du centre du limbe soit à une petite distance du sommet, sur le plan bissecteur de l'angle réfringent. On déplace la plate-forme de façon que le faisceau incident se réfracte dans l'angle que l'on a mesuré. On reçoit dans la lunette le faisceau réfracté. On fait tourner le prisme, en suivant l'image avec la lunette jusqu'à saisir le moment où le prisme, tournant toujours dans le même sens, on constate que le faisceau réfléchi revient en sens contraire. On note la position de la lunette lorsqu'on a saisi le minimum de déviation et lorsque l'image, au moment où change le sens de son mouvement, est sur le fil du réticule.

L'angle des deux positions de la lunette ainsi déterminé est l'angle de déviation minimum.

Remarque. — Lorsque l'on éclaire la fente avec une lumière monochromatique, comme la flamme de l'alcool sodé, on a une image bien nette de la fente. Si, au contraire, on opère en lumière composée, l'image de la fente s'étale sous forme d'un spectre. Nous étudierons plus loin le spectre fourni par la lumière blanche. Disons tout de suite cependant que dans l'observation du minimum de déviation, on devra considérer les différentes parties du spectre et faire la détermination pour chacune d'elles. Nous verrons plus loin que les spectres des sources lumineuses sont sillonnés de raies noires dites raies de Frauenhofer et que l'on désigne par les lettres de l'alphabet. Une des raies les plus importantes est celle correspondant au sodium et que l'on désigne par la lettre D_1 C'est à cette raie que l'on rapporte ordinairement les observations d'indices. Les indices ainsi déterminés sont dits *indices moyens*.

Digitized by Google

Pour les liquides, on se sert d'un flacon prismatique fermé par deux lames à faces parallèles et dans lequel on renferme le liquide étudié (*fig. 137*).

Avant de faire une expérience de mesure d'indice, on devra s'assurer que le prisme, vide de liquide, ne fait subir aucune déviation aux rayons lumineux. Dans le cas contraire, on ajoute ou on retranche cette déviation de la déviation obtenue avec le liquide, suivant qu'elle s'est produite sur le sommet ou vers la base du prisme.

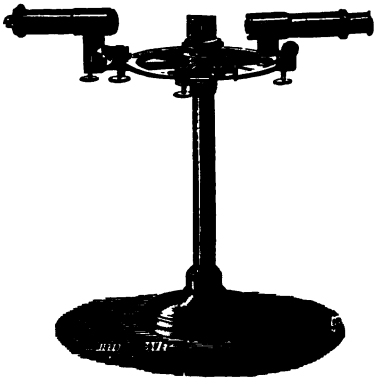


Fig. 137

Remarque. — Les indices ainsi déterminés par rapport à l'air doivent être multipliés par 1,000293 pour être rapportés au vide.

Mesure des indices de réfraction dans le cas où le corps est taillé en lame à faces parallèles

Méthode du duc de Chaulnes

Mode opératoire

On place sur le porte-objet du microscope une lame de verre portant sur sa face supérieure une croisée de traits ou une division micrométrique et on met l'instrument au point.

Plaçons maintenant au-dessus de cette lame, la lame dont on veut déterminer l'indice, il faudra, pour mettre de nouveau au point,

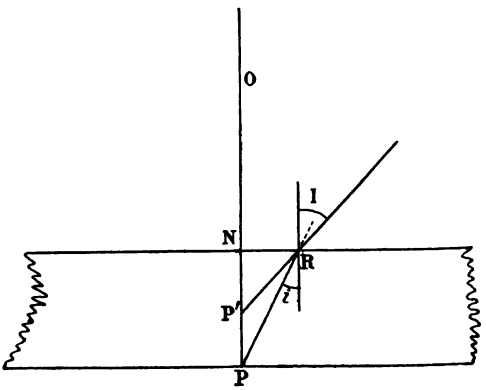


Fig. 138

Digitized by Google

relever le microscope. Le déplacement d est mesuré par une vis micrométrique.

Il est facile de voir qu'on a sensiblement (*fig. 138*)

$$d = PP' = NP - NP' = e - \frac{e}{n} = e\frac{n-1}{n},$$

e étant l'épaisseur de la lame étudiée, n l'indice cherché.

Méthode de Bertin

La méthode du duc de Chaulnes exige l'emploi d'une vis micrométrique. Elle a été modifiée par Bertin de la façon suivante :

1° On met le microscope au point sur le micromètre seul, et on mesure, à la chambre claire, le grossissement G_1 (Voir page 188).

2° On place ensuite la lame soumise à l'expérience sur le micromètre et on met au point en déplaçant seulement l'oculaire. On mesure de nouveau le grossissement G_2.

3° On place le micromètre au-dessus de la lame, on met au point en déplaçant l'oculaire et on mesure le grossissement G_3.

Un calcul simple montre que l'indice cherché est exprimé par la formule

$$n = \frac{G_2}{G_1}\frac{G_1 - G_3}{G_2 - G_3}.$$

Remarque. — Cette méthode est applicable aux lames liquides.

EMPLOI DES RÉFRACTOMÈTRES

Il arrive souvent dans le cas des liquides, que l'on a à sa disposition que de très petites quantités du liquide que l'on veut étudier. Les méthodes précédentes deviennent alors, sinon impossibles du moins très difficiles à appliquer. On se sert alors d'appareils appelés *réfractomètres*. Il en existe plusieurs modèles, nous ne décrirons que le réfractomètre à lentille de M. Piltschikoff, et celui de M. Charles Féry.

Le principe du réfractomètre de M. Piltschikoff est la relation qui existe entre l'indice de réfraction d'une lentille, ses rayons

Digitized by Google

de courbure et sa distance focale ; appelons n l'indice d'une lentille, R_1 et R_2 ses rayons de courbure ; f sa distance focale, on a entre ces quantités la relation :

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

L'appareil se compose de trois parties :

1° Un collimateur recevant les rayons lumineux d'une lampe monochromatique à chlorure de sodium ; ce collimateur est constitué par une fente placée en *c* (*fig. 139*) au foyer d'une lentille *b* qui concentre sur elle les rayons venus de la lampe et placée également au foyer d'une lentille *d* ;

2° Les rayons parallèles sortant de cette lentille *d* vont tomber sur une lentille creuse constituée par un ménisque en crown-glass de courbure convenable ;

3° Au sortir de cette lentille creuse, les rayons viennent former l'image de la fente *c* sur un écran *f* placé au foyer de la lentille creuse. Cet écran *f* en verre dépoli contient un réticule formé par deux traits en croix ; une loupe *g* facilite la mise au point. On fait coïncider l'image de la fente *c* avec le trait vertical.

Mode opératoire

La lentille creuse étant vide, on règle l'appareil de façon à voir nettement la fente *c* coïncider avec le réticule placé en *f*. On place ensuite le liquide à essayer dans la lentille creuse. La coïncidence est détruite ; pour la rétablir, il faut déplacer l'écran *f* d'une certaine quantité, au moyen d'une crémaillère ménagée à cet effet dans le tube C ; ce déplacement se mesure sur une échelle divisée. Si cette division est faite en millimètres, il faudra établir la *tare* de l'appareil, c'est-à-dire construire une table donnant les indices correspondants à des déplacements déterminés. D'ailleurs, l'appareil est souvent construit de telle sorte que l'échelle divisée indique immédiatement l'indice cherché.

Réfractomètre de M. Ch. Féry

Le principe de cet appareil consiste à annuler par un prisme solide d'angle variable et d'indice constant la déviation imprimée

Digitized by Google

à un rayon lumineux par un prisme creux d'angle fixe rempli du liquide dont on veut déterminer l'indice.

Les deux faces du prisme à liquide d'angle assez petit sont

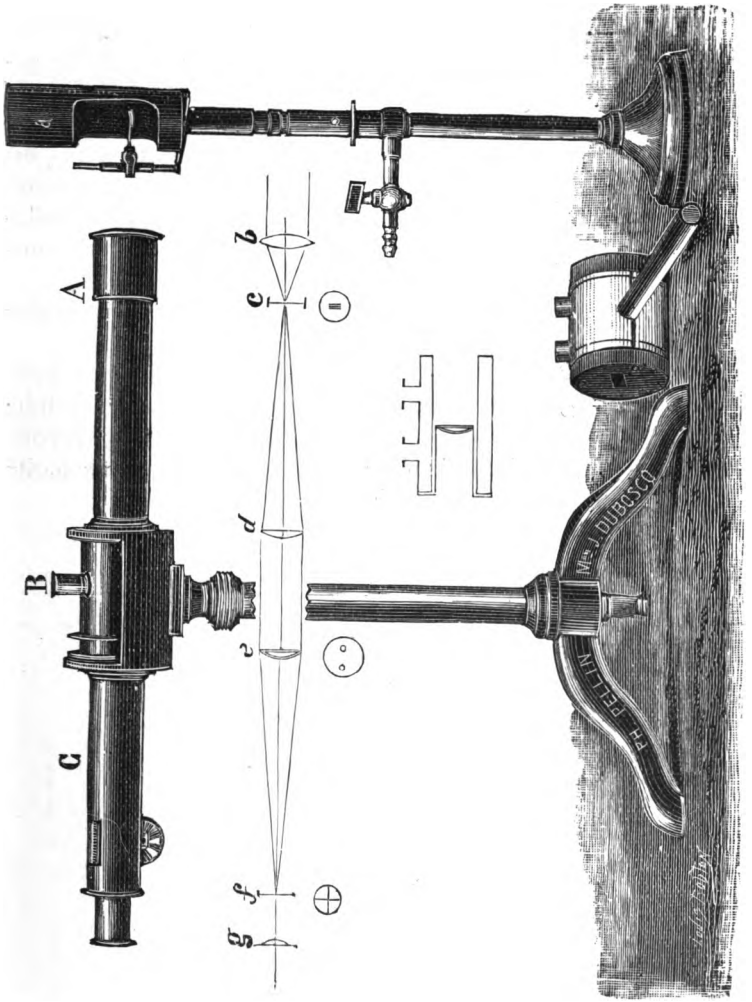


Fig. 139

constituées par deux lames de glace identiques, planes à l'intérieur et convexes extérieurement. Les deux faces de ce prisme constituent par suite deux lentilles plan-convexes. Soient O et

Digitized by Google

O′ les centres optiques de ces deux lentilles ; il est facile de voir que, lorsque le prisme est vide, un rayon lumineux tombant en O sortira en O′ parallèlement à sa direction d'entrée. Si l'on introduit un liquide dans le prisme, le rayon émergent est dévié, mais on peut trouver un autre point de la cuve, C par exemple, où le rayon émergent sera de nouveau parallèle au rayon incident (*fig. 140*). Appelons x l'indice du liquide étudié, d la distance des deux points O et C ; la théorie de l'appareil, qu'il est d'ailleurs facile d'établir, montre que x et d sont liés par la relation $x - 1 = Kd$, K étant une constante de l'appareil.

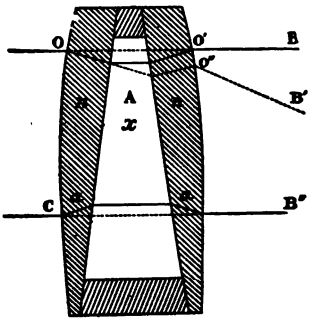


Fig. 140

La figure 158 montre l'ensemble de l'appareil.

La lumière provenant d'un brûleur D à chlorure de sodium tombe sur un collimateur B ; les rayons sortant du collimateur tombent sur la cuve et sont reçus ensuite dans une lunette ordinaire à réticule.

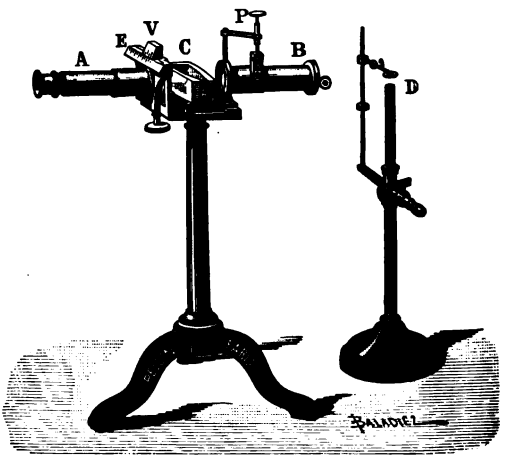


Fig. 141

La cuve est placée sur une plate-forme et peut recevoir un déplacement perpendiculaire à l'axe optique de la lunette au

Digitized by Google

moyen d'un bouton moleté. Ce déplacement peut se mesurer au moyen d'un vernier entraîné dans le mouvement de la cuve et mobile devant une échelle divisée.

On peut ainsi apprécier le déplacement de la cuve avec trois décimales et par suite l'indice avec trois décimales également.

Remarque. — L'appareil est en général construit de façon que la constante K soit égale à 1 lorsque les mesures sont rapportées à la raie D du sodium. Dans ce cas, les déplacements du zéro du vernier donnent immédiatement l'indice cherché.

Indices de réfraction

Valeurs numériques des indices de réfraction de quelques substances solides et liquides, dont on a le plus fréquemment à faire usage :

N°s	CORPS MONORÉFRINGENTS	Densités	Températures
	Flints		
1	Feil lourd, N° 2	5,00	22,5
2	Rossette lourd, N° 3	4,08	12,4
3	Feil F (1249).	3,68	24,0
4	Robichon	3,63	13,7
5	Feil B (1227)	3,54	23,2
	Crowns		
6	Feil lourd (1185).	3,00	21,9
7	Feil (1209).	2,80	21,2
8	Rossette, N° 1.	2,55	18,4
9	Saint-Gobain (glace brute)	2,50	17,8
10	Feil léger (128)	2,49	23,5

Digitized by Google

Indices pour sept raies du spectre

Nos	B	C	D	*b*	F	G	H
1	1,7801	1,7831	1,7920	1,8062	1,8149	1,8368	1,8567
2	1,6771	1,6795	1,6858	1,6959	1,7019	1,7171	1,7306
3	1,6237	1,6255	1,6304	1,6384	1,6429	1,6549	1,6647
4	1,6131	1,6149	1,6198	1,6275	1,6321	1,6435	1,6534
5	1,6045	1,6062	1,6109	1,6183	5,6225	1,6335	1,6428
6	1,5554	1,5568	1,5604	1,5658	1,5690	1,5769	1,5836
7	1,5157	1,5166	1,5192	1,5284	1,5256	1,5313	1,5360
8	1,5226	1,5237	1,5265	1,5307	1,5332	1,5392	1,5442
9	1,5244	1,5254	1,5280	1,5320	1,5343	1,5397	1,5443
10	1,5126	1,5134	1,5160	1,5198	1,5222	1,5278	1,5323

Dans ce tableau et dans celui de la page suivante, on trouve les indices de réfraction de quelques-uns des verres, flints, flints légers et crowns qui se trouvent dans le commerce et qui sont employés dans les appareils d'optique et de photographie.

Ces indices de réfraction ont été rapportés aux raies visibles du spectre.

Tableau des indices de réfraction

Nos	CORPS MONORÉFRINGENTS	Densités	Températures
	Flints légers		
1	Rossette, No 1.	3,44	19,5
2	Feil (1226).	3,24	22,0
3	Rossette, No 2.	3,22	18,4
4	Feil très léger (1232).	2,98	23,2

Digitized by Google

Indices pour sept raies du spectre

Nos	B	C	D	*b*	F	G	H
1	1,5966	1,5982	1,6027	1,6098	1,6141	1,6246	1,6338
2	1,5766	1,5783	1,5822	1,5887	1,5924	1,6018	1,6098
3	1,5659	1,5675	1,5715	1,5776	1,5813	1,5902	1,5979
4	1,5609	1,5624	1,5660	1,5715	1,5748	1,5828	1,5898

CORPS MONORÉFRINGENTS	INDICE de réfraction	PARTIE du spectre
Acide arsénieux	1,748	Rouge
Agate blonde	1,755	Jaune
Alun de potasse	1,4564	Raie D
— de chrome.	1,4814	Raie D
Azotate de plomb	1,758	
Crown lourd; densité: 3,00; temp.: 21°,9.	1,5604	Raie D
— léger; — :3,402; — 13°,06.	2,5154	Raie D
Diamant incolore	2,414	
— brun.	2,428	
Flint de Faraday; densité: 5,00; temp. : 22°,5.	1,792	
Flint léger; densité: 3,44; temp.: 19°,5.	1,6027	

Digitized by Google

Tableau des indices de réfraction

CORPS LIQUIDES	Températures	INDICES	PARTIE du spectre
Acide acétique cristallisable		1,375	Raie D
— azotique		1,410	
— chlorhydrique concentré		1,410	
— phénique (1)	13	1,549	
	25	1,543	Raie B
	30	1,541	
Albumine		1,360	
Alcool absolu	10	1,366	Raie D
— méthylique			Raie D
Ammoniaque			Raie D
Baume copahu		1,513	Raie D
— de Canada (d'après Young)		1,532	Rouge
Benzine		1,413	Raie D
Chloroforme	10	1,449	Raie D
Eau	20	1,3336	Raie D
—	20	1,332	Raie D
Essence d'amandes amères		1,550	Raie E
— de bergamotte	12	1,468	Raie E
— de camomille	12	1,462	
— de canelle du Ceylan	12	1,563	
— de citron	12	1,479	
— de fenouil	12	1,555	
— de lavande	12	1,467	
— de térébenthine	12	1,476	Raie D
— de thym		1,483	Raie D
Ether acétique	20	1,368	Raie D
— sulfurique		1,368	Raie D

(1) L'acide phénique est solide et fond à 34°, mais une fois fondu, il conserve l'état liquide jusqu'à 12°,5, si on le refroidit lentement. BUIGNET.

Digitized by Google

CORPS LIQUIDES	Températures	INDICES	PARTIE du spectre
Ether formique.	22	1,358	Raie D
Glycérine	30	1,468	Raie D
Huile d'amandes douces		1,469	Rouge extrême
— de noix		1,477	
— de lin		1,495	Rouge W
— de naphte		1,475	
— de navette		1,475	
— d'olive.		1,470	
— de pavot		1,479	
— de ricin		1,481	
— de foie de morue		1,481	Raie D
— de colza		1,475	Raie D
Humeur aqueuse de l'œil		1,337	
— vitrée —		1,339	
Sirop de sucre		1,464	
Sulfure de carbone	10	1,633	Raie D
Vinaigre distillé.		1,372	

Digitized by Google

SPECTROSCOPIE

Quand on reçoit sur un prisme de verre un faisceau de lumière blanche, on observe que le faisceau émergent est non seulement dévié et étalé, mais encore composé de couleurs différentes. C'est le phénomène connu sous le nom de dispersion. On distingue ordinairement sept couleurs principales : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé et rouge. La réunion de ces couleurs constitue le spectre.

Lorsque le faisceau de lumière blanche est fourni par une source lumineuse constituée par un corps solide ou liquide incandescent, on observe simplement le spectre tel que nous venons de le décrire. On dit alors qu'il est continu.

Si, au contraire, la lumière est fournie par une vapeur incandescente, le spectre, au lieu d'être formé par une série continue de plages colorées, est constituée par un certain nombre de lignes ou de bandes colorées séparées par des intervalles obscurs, un pareil spectre est appelé *spectre de lignes*.

Recevons au contraire, sur un prisme, un pinceau de rayons solaires, isolés au moyen d'une fente étroite. Nous constaterons sur l'écran que le spectre formé est sillonné de lignes ou de bandes noires se détachant sur les bandes colorées. Cette observation fut faite pour la première fois par Wollaston.

Frauenhofer étudia ensuite ces raies du spectre solaire et les caractérisa en les désignant par les lettres de l'alphabet. Plus tard, Kirckhoff et Bunsen, et après eux de nombreux observateurs, purent, à mesure que se perfectionnaient les appareils d'observations, observer et cataloguer un très grand nombre de raies. Ces observations se font au moyen d'appareils appelés *spectroscopes*.

Foucault, en 1879, a démontré expérimentalement un point

Digitized by Google

des plus importants. Les vapeurs incandescentes absorbent les radiations qu'elles émettent.

Considérons une vapeur incandescente, par exemple la vapeur du sodium, elle donnera un spectre caractérisé par une belle raie jaune. Interposons maintenant sur le trajet d'un faisceau lumineux donnant un spectre continu, de la vapeur de sodium. On verra se produire à la place qu'occuperait dans le spectre cette raie jaune une bande sombre. C'est l'expérience connue sous le nom de renversement de la raie D.

En procédant de même avec les vapeurs de différents métaux ou sels métalliques, on a pu constater que les raies du spectre solaire correspondaient aux raies brillantes émises par ces vapeurs métalliques. De là le nom de spectre d'absorption donné à ce spectre sillonné de raies ou de bandes sombres.

Remarque. — Il est indispensable, pour observer ces raies, de faire l'expérience sur un faisceau fourni par une fente très étroite.

L'expérience a montré que des quantités extrêmement faibles d'un corps étaient cependant suffisantes pour provoquer dans un

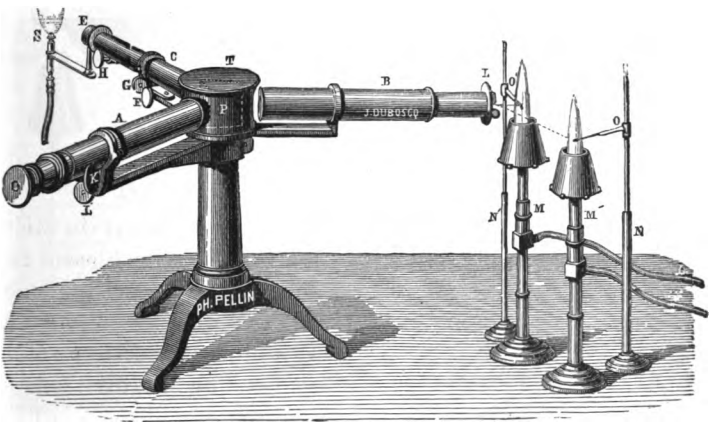


Fig. 142

spectre d'émission la formation des raies brillantes caractéristiques de ce corps, ou dans un spectre d'absorption les raies obscures correspondantes. De là une méthode extrêmement précieuse d'analyse, à laquelle on a donné le nom d'analyse spectrale.

Digitized by Google

La figure 142 représente le spectroscope à trois corps, le plus généralement employé dans les laboratoires de physique.

B est le collimateur dont la fente est en L, T la plate-forme qui supporte le prisme P, A une lunette astronomique visant à l'infini et portée par une alidade mobile pouvant tourner autour d'un axe vertical passant par le milieu de la plate-forme qui supporte le prisme ; E un micromètre porté par le tube C. En O et O′ on voit deux brûleurs. Dans leurs flammes sont plongés des fils de platine trempés dans des dissolutions alcooliques de différents sels. Le petit bec papillon S éclaire le micromètre.

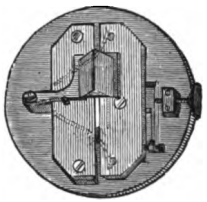


Fig. 143

La figure 143 représente la fente L du collimateur pouvant s'élargir à volonté à l'aide d'une vis.

La figure 144 représente la même fente munie d'un petit prisme à réflexion totale I, qui renvoie les rayons du brûleur H dans la moitié supérieure de la fente pendant que la moitié inférieure reçoit les rayons du brûleur G. On voit ainsi dans le spectroscope deux spectres, l'un au-dessous de l'autre.

La figure 145 représente la marche des rayons dans le spectroscope. C'est le collimateur qui envoie des rayons de la source S. Ces rayons traversent le prisme P, suivant I I′ et entrent dans la lunette L.

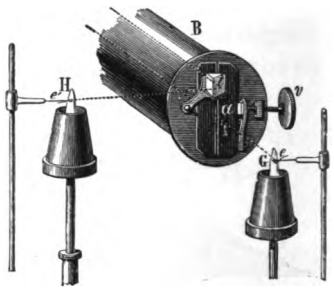


Fig. 144

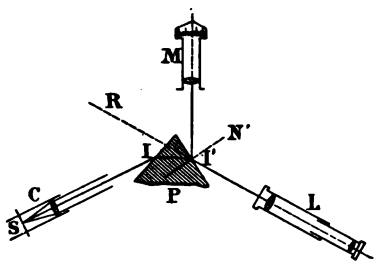


Fig. 145

Les rayons issus du micromètre M se réfléchissent en I′ sur la face du prisme et pénètrent dant la lunette. On voit ainsi le spectre en même temps que les divisions du micromètre.

Le prisme P du spectroscope est placé dans la position du minimum de déviation.

On se sert souvent actuellement d'un spectroscope à vision directe dont la construction est représentée schématiquement par la figure 147 et en élévation figure 146.

C est le collimateur, L la lunette qui peut recevoir un déplace-

Digitized by Google

ment horizontal au moyen d'une crémaillère E, P est un prisme à vision directe, M le micromètre dont le tube est également mobile au moyen de la vis E (1).

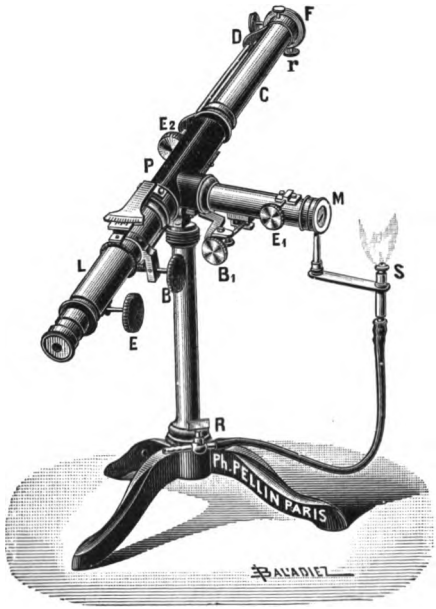


Fig. 146

Mode opératoire

Placer devant la fente la source à étudier, régler l'ouverture de cette fente de façon à avoir une image aussi nette que possible. Mettre au point l'oculaire de la lentille L, de façon à voir cette image dans le plan du réticule.

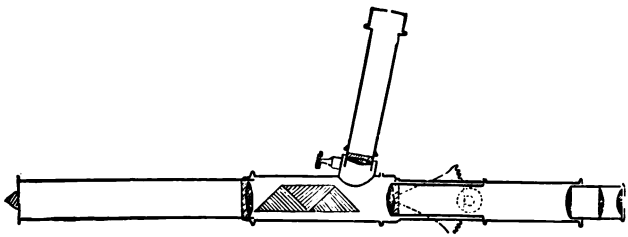


Fig. 147

Déplacer le micromètre pour que son image vienne également se faire dans ce plan.

Etude des flammes colorées par des dissolutions métalliques

On trempe un fil de platine dans la solution à étudier et on l'introduit dans la flamme du brûleur.

---

(1) Deux vis B et B_1 permettent de donner à la lunette et au micromètre des déplacements latéraux.

Digitized by Google

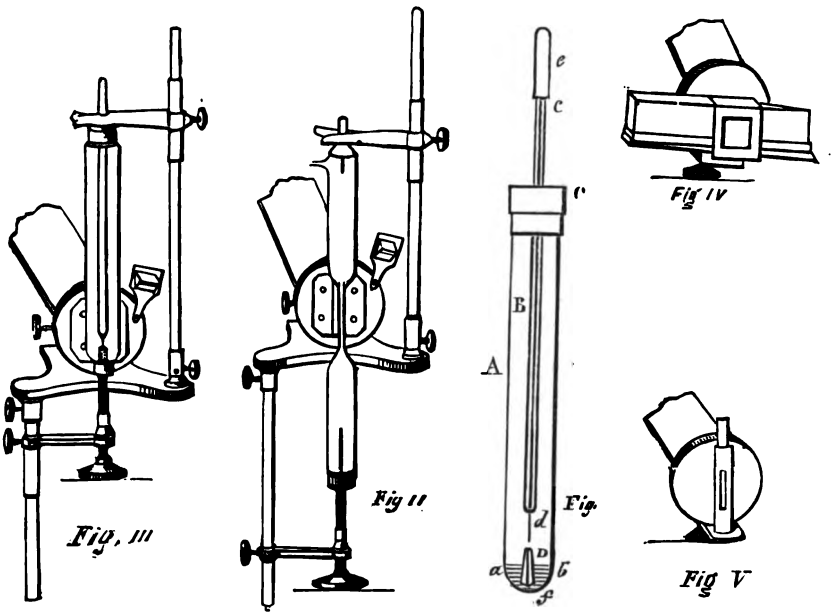


Fig. 148

Il est préférable d'employer, pour l'étude des spectres des vapeurs métalliques, le tube de Delachanal et Mermet représenté par la figure ci-contre. A est un tube à essai dont le fond est traversé par un fil de platine *f* entouré d'un petit tube capillaire D.

De même, le bouchon est traversé par un tube semblable contenant également un fil de platine *d*. On met en *a b* le liquide à étudier. Celui-ci monte par capillarité et vient mouiller le fil de platine. Entre *f* et *d* on fait éclater l'étincelle produite par une bobine d'induction. On observe alors, au spectroscope, une série de raies brillantes que l'on peut repérer au moyen du micromètre.

Pour étudier les gaz on les enferme dans des tubes dits tubes de Geissler.

Un support adapté au collier du collimateur, sert à tenir ces différents tubes, comme le montre les figures II et III.

On étudie ainsi les spectres fournis par les vapeurs ou les gaz incandescents. Ce sont là des spectres d'émission, lesquels se composent d'un plus ou moins grand nombre de raies brillantes se détachant sur fond obscur au moyen de la graduation du micromètre. On déterminera pour chaque dissolution métal-

Digitized by Google

lique la place de chaque raie en prenant comme point de repère la raie jaune du sodium, facile à distinguer entre toutes.

La figure 149 montre les positions des raies pour quelques métaux alcalins ou alcalins-terreux. On remarquera dans le spectre du sodium la raie D.

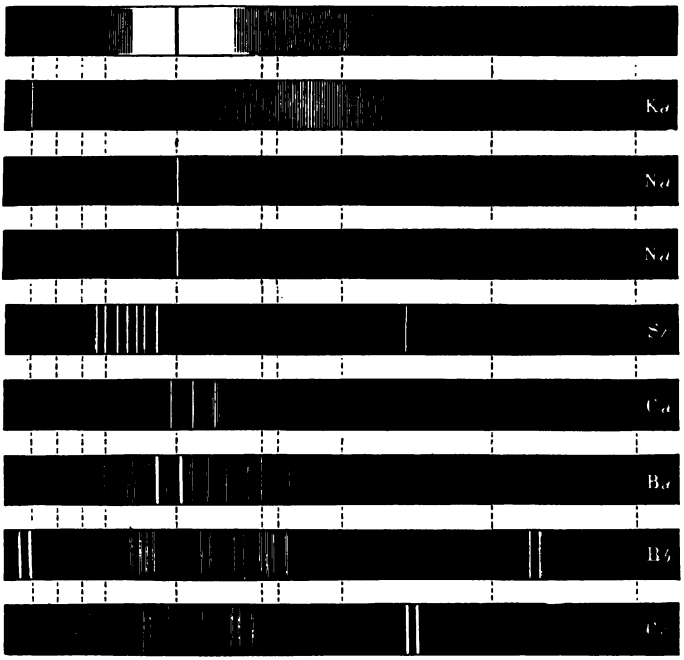


Fig. 149

Le potassium (K) montre deux belles raies, l'une dans le rouge, l'autre dans le violet.

Le lithium (Li) une raie rouge, une raie jaune.

Le strontium (Sr) plusieurs raies rouges, une autre dans l'orangé, une dans le bleu.

Le baryum (Ba) un ensemble de raies comprises entre le rouge et le bleu, etc.

SPECTRES D'ABSORPTION

Plaçons devant la fente du collimateur un bec de gaz ordinaire, ou un bec Auer, ou une lampe à huile, nous observerons dans le spectroscope un spectre complet sans raies.

Digitized by Google

Plaçons maintenant, entre la source lumineuse et le spectroscope un brûleur Bunsen dans la flamme incolore duquel nous introduirons une petite coupelle contenant du chlorure de sodium. La flamme du brûleur devient jaune et nous pouvons observer que, à l'endroit même où nous apercevions tout à l'heure, dans une des expériences précédentes, une belle raie jaune sur fond brun, nous voyons maintenant une bande noire sur fond coloré des divers couleurs du spectre.

On exprime ce fait en disant que le sodium incandescent a absorbé les radiations qu'il émettait. On a ainsi formé un spectre d'absorption.

Un grand nombre de substances, comme les verres colorés et certaines dissolutions telles que les dissolutions de chlorophylle et de sang, présentent des spectres d'absorption caractéristiques.

OBSERVATION DES SPECTRES D'ABSORPTION

Mode opératoire

Verres colorés. — On intercepte le faisceau lumineux en interposant une lame de verre coloré. On observe alors des

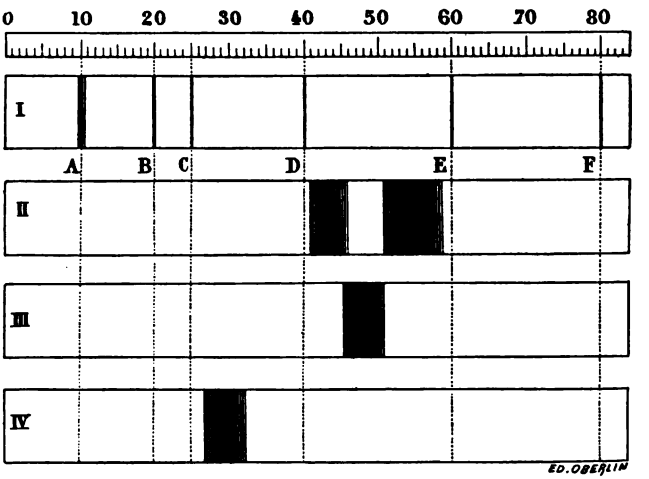


Fig. 150

bandes sombres dans une ou plusieurs régions du spectre, suivant la pureté de la couleur.

Dissolutions. — On place le liquide à étudier dans de petites

Digitized by Google

cuves à faces parallèles. Comme exemple de liquides donnant des spectres d'absorption remarquables, nous citerons le bichromate de potasse et le permanganate de potasse.

Un exemple important nous est fourni par le sang, dont la présence dans une dissolution, même très étendue, sera décelée par la production de deux bandes d'absorption, l'une dans le jaune, l'autre dans le vert (II).

Les réducteurs, tels que l'acide sulfhydrique, le sulfhydrate d'ammoniaque font disparaître les deux bandes et font voir seulement une bande unique placée entre les deux précédentes.

L'acide acétique, au contraire, donne une bande placée près de la raie C (III).

La chlorophylle permet également d'observer une large bande dans le rouge, une deuxième entre le rouge et l'orangé, une troisième entre le jaune et le vert, une quatrième dans le vert; au-delà du bleu, tout est absorbé.

Parmi les gaz, nous citerons le peroxyde d'azote et la vapeur d'iode.

SPECTRE SOLAIRE

On recevra sur la fente du collimateur les rayons venus du soleil. On observera les raies noires du spectre obtenues. En repérant ces raies on déterminera à quels métaux ils appartiennent (Voir Tables de Salet).

Remarques. — 1° La raie de sodium est double; pour essayer de la dédoubler il est indispensable de donner à la fente la plus petite largeur possible. On doit se servir de cette observation pour donner le dernier réglage à l'appareil.

2° Avant de plonger dans la flamme un fil de platine trempé dans une dissolution, il faut s'assurer qu'il ne fournit aucun spectre, c'est-à-dire qu'il ne tient à sa surface aucune impureté. Dans le cas où il donnerait un spectre, on le purifierait en le portant plusieurs fois à l'incandescence.

3° Les spectres étant assez fugitifs, il est bon d'avoir l'œil à l'oculaire avant d'introduire le fil de platine dans la flamme.

4° On remarquera que dans les spectres d'absorption des dis-

Digitized by Google

solutions, la largeur et la netteté des bandes dépendent du titre de la solution.

On obtient de fort beaux spectres en volatilisant directement les métaux dans l'arc électrique. Un dispositif spécial (Revolver) permet de faire successivement plusieurs observations sur différents métaux. On peut encore, dans certains cas (ex. aluminium, plomb, nickel, zinc), prendre des électrodes formées du métal étudié.

Graduation d'un spectroscope en longueurs d'onde

Bien que la notion des longueurs d'onde sorte un peu du cadre de cet ouvrage, nous n'hésitons pas à indiquer cette manipulation, qui constitue un excellent exercice de laboratoire et qui n'offre pas, en somme, de bien grandes difficultés. Nous avons vu que les observations faites au spectroscope étaient repérées au moyen des divisions du micromètre. Pour quelles soient comparables d'un instrument à l'autre, il faut faire choix d'une échelle déterminée à laquelle devront être rapportées toutes les observations. C'est le but que nous allons nous proposer dans le mode opératoire suivant :

Donnons d'abord une définition indispensable. C'est celle de la longueur d'onde.

Considérons un mouvement vibratoire quelconque. Soit N le nombre de vibrations effectuées pendant une seconde. Chaque vibration dure donc un temps $T = \frac{1}{N}$.

Soit V la vitesse de propagation du mouvement vibratoire. Pendant le temps T, l'espace parcouru a été $VT = \frac{V}{N}$. On désigne cet espace par la lettre λ et on l'appelle la *longueur d'onde*.

Dans le cas de la lumière, qui, on le sait, est le résultat d'un mouvement vibratoire, chaque lumière simple est caractérisée par la valeur de λ.

Pour mieux dire, chaque région du spectre, chaque raie possède une longueur d'onde différente. Le tableau suivant donne les longueurs d'onde de quelques raies du spectre solaire ainsi que de quelques spectres de sources artificielle :

Digitized by Google

Spectre solaire. Partie visible

Raies	Longueurs d'onde en millièmes de millimètres	
A	760,4	
B	686,7	
C	656,2	(hydrogène).
D	589,5 588,9	(Sodium).
F	486,1	(Hydrogène).
G	430,7	(Fer).
h	410,1	(Hydrogène).
H	396,7	(Calcium).
K	393,3	(Calcium).

Sources artificielles

Potassium (raie violette γ)	404,5.
Strontium (— bleue)	460,7.
Argent (raie verte β)	520,8.
— (— α)	546,8.
Lithium (rouge α)	770,6.

Mode opératoire

On fait coïncider la raie jaune du sodium (facile à obtenir avec une flamme d'alcool sodé), avec la division 100 du micromètre. On détermine ensuite, en ayant soin de ne pas déplacer le micromètre, les positions occupées par quelques raies bien nettes prises parmi celles que nous venons de citer.

On construit alors une courbe de la façon suivante :

On trace sur une feuille de papier quadrillé deux axes rectangulaires. Sur l'un, l'axe horizontal, par exemple, on porte des

Digitized by Google

longueurs proportionnelles aux indications du micromètre; sur l'autre des longueurs proportionnelles aux longueurs d'onde des raies observées (supposées connues).

Remarque. — L'échelle de proportionnalité n'est pas nécessairement la même sur les deux axes. *Elle est absolument arbitraire.*

On obtient ainsi plusieurs points. En les joignant par un trait continu, on a une courbe *relative au spectroscope employé, seulement.*

On peut alors se servir de cette courbe, soit pour reconnaître la nature des corps dont la présence est signalée par une ou plusieurs raies, soit pour déterminer la longueur d'onde d'une raie donnée. A cet effet, on note la division correspondant à cette raie (la raie D occupant toujours la division 100), et on cherche le point de la courbe située sur une perpendiculaire à l'axe horizontal menée par le point correspondant à cette division. La longueur de cette perpendiculaire mesure, à l'échelle adoptée, la longueur d'onde de la raie considérée. En se rapportant aux tables qui donnent les longueurs d'onde de toutes les raies connues, on trouvera à quel corps se rapporte cette longueur d'onde ainsi calculée. (Tables de Salet).

COLORIMÈTRE

On appelle ainsi un instrument destiné à mesurer l'intensité de coloration des liquides vus par transparence. Pour faire cette mesure, on compare l'absorption produite sur la lumière par une hauteur variable de liquide étudié avec celle produite par une hauteur déterminée d'un liquide normal.

La figure 151 montre le colorimètre Duboscq.

Un miroir M, porté par le socle de l'instrument et qu'on peut incliner à volonté permet d'éclairer également les deux couches liquides qu'il s'agit de comparer et qui sont contenues dans deux godets C et C'. Pour faire varier l'épaisseur des colonnes liquides que la lumière doit traverser, on a placé dans les récipients C C' deux plongeurs cylindriques T T', composés de deux cylindres massifs en verre, dont les faces terminales sont planes et parallèles.

Digitized by Google

Une graduation en millimètres permet de mesurer avec précision la quantité dont on déplace ces plongeurs, le zéro de cette graduation correspondant au cas où les plongeurs touchent le fond des godets.

Au-dessus des deux plongeurs se trouvent deux parallélipipèdes en verre dans lesquels les deux faisceaux lumineux sortant des cylindres de verre, subissent deux réflexions intérieures et sortent rapprochés. On les observe simultanément au moyen d'une petite lunette.

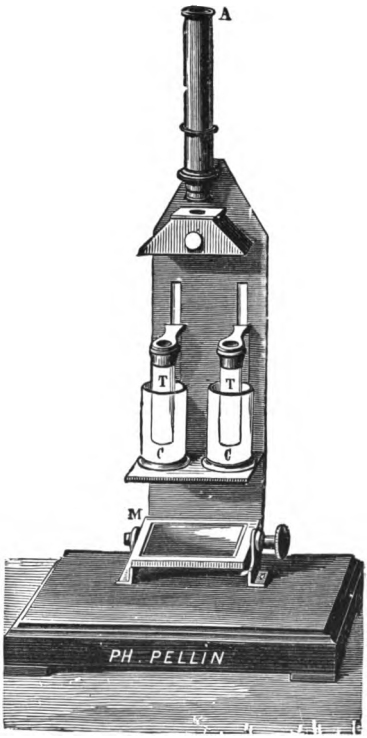


Fig. 151

Quand les liquides à comparer sont de même nature et par suite de même couleur, une expérience facile à comprendre permet de mesurer le rapport des intensités de coloration. Il suffit de placer les liquides dans les godets, de donner au plongeur correspondant à la solution normale une position déterminée et de déplacer l'autre de façon que les deux parties du champ visible dans la lunette paraissent également colorées. Les colorations des deux solutions sont alors en raison inverse des hauteurs qu'on a dû donner aux colonnes liquides de ces dissolutions.

Si les liquides à comparer ne sont pas de même matière, on remplacera la lunette L par un spectroscope à vision directe analogue à celui que nous avons déjà décrit et l'on comparera les intensités de bandes d'absorption déterminées dans les deux spectres obtenus à travers les deux dissolutions. L'appareil prend alors le nom de spectro-colorimètre.

Le cadre de cet ouvrage ne peut pas comprendre l'exposé des

Digitized by Google

phénomènes optiques connus sous le nom de double réfraction et de polarisation de la lumière.

Néanmoins, nous avons cru devoir faire une place, parmi nos manipulations, à celles relatives à la saccharimétrie.

Le dosage du sucre constitue, en effet, non seulement une manipulation importante en elle-même, mais encore fertile en enseignements pour l'étudiant qui les fait. Nous engageons donc vivement nos lecteurs à en suivre attentivement les détails, après, toutefois, avoir préalablement étudié ou s'être fait expliquer les phénomènes optiques sur lesquels est fondé l'emploi des saccharimètres.

Digitized by Google

SACCHARIMÉTRIE

La figure 153 représente la disposition générale des pièces qui composent la partie optique du saccharimètre Soleil. Ces pièces sont ajustées dans des montures fixées à chaque extrémité d'une règle et disposées de telle façon qu'on puisse placer facilement les tubes destinés à recevoir la dissolution sucrée dont on veut déterminer le titre.

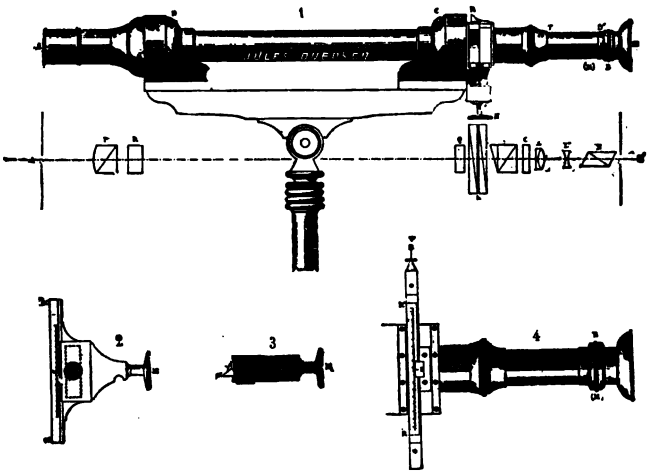


Fig. 152

On peut concevoir l'appareil comme composé de quatre parties distinctes : 1° le polariseur ; 2° le tube renfermant la dissolution soumise à l'analyse ; 3° l'analyseur ; 4° le producteur des teintes.

Le polariseur se compose d'un prisme de spath d'Islande achromatisé par un prisme de crown-glass terminé par une surface convexe. Il est suffisamment éloigné du diaphragme pour ne laisser passer que l'image extraordinaire ; après le prisme bi-réfringent vient la plaque à deux rotations. Cette plaque est formée de deux plaques de quartz à rotations

Digitized by Google

contraires, juxtaposées l'une à côté de l'autre de façon que la surface de séparation soit verticale et parallèle à l'axe de l'appareil. Les faces parallèles de cette plaque seront donc perpendiculaires à cet axe.

Après le polariseur, vient le tube contenant la substance que l'on veut analyser.

La troisième partie de l'appareil, ou analyseur, se compose : 1° d'une plaque de quartz de rotation contraire à celle du sucre cristallisable ; 2° de deux quartz prismatiques de rotation contraire à celle de la première plaque et accolés à des plaques prismatiques égales de verre, de manière à former une nouvelle plaque rectangulaire d'épaisseur constante ; à l'aide d'un mouvement à double crémaillère, on peut les faire glisser l'une sur l'autre. Par ce mouvement, on fait varier l'épaisseur à l'aide de la lame compensatrice sans que les faces opposées cessent d'être parallèles. L'épaisseur du système des deux prismes étant la même dans la position normale que celle de la plaque à rotation inverse, il en résulte que les actions se composent et l'effet total est zéro. En avant de ce système de prismes se trouve une petite lunette de Galilée qui sert à placer les images à la vision distincte, correspondant à la plaque à deux rotations. Devant l'objectif de cette lunette se trouve une lame de quartz qui avec le prisme de Nicol fixé dans une lunette peut tourner devant l'oculaire et forme ce qu'on appelle le producteur des teintes.

Mode opératoire

Placer une lampe devant l'ouverture A du saccharimètre. Régler l'instrument de manière que la lumière passe bien suivant l'axe. Remplir d'eau distillée le tube de 20 centimètres. Faire mouvoir le porte-oculaire D′ de manière à voir nettement la ligne noire verticale qui sépare la lame bi-quartz en deux parties égales.

Tourner le bouton H du compensateur, soit à droite soit à gauche, jusqu'à ce que les teintes des deux demi-disques soient de couleurs identiques.

Faire tourner le bouton moleté dans un sens ou dans l'autre jusqu'à ce que les deux demi-disques soient colorés de la teinte sensible qui est, pour le plus grand nombre des observateurs une nuance violacée qui rappelle la couleur gris de lin.

Si, après cette opération, l'identité de teintes n'était pas parfaite, on la rétablirait en tournant le bouton H.

Digitized by Google

La partie optique ainsi réglée, il ne reste plus qu'à amener le

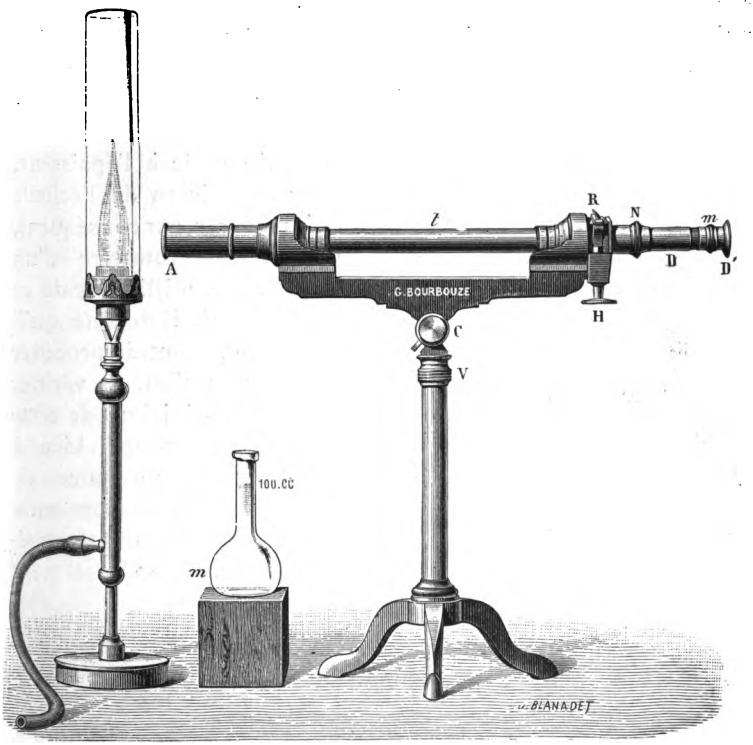


Fig. 153

zéro de l'échelle RR′ en coïncidence avec le trait de l'indicateur à l'aide de la petite vis de rappel *v*.

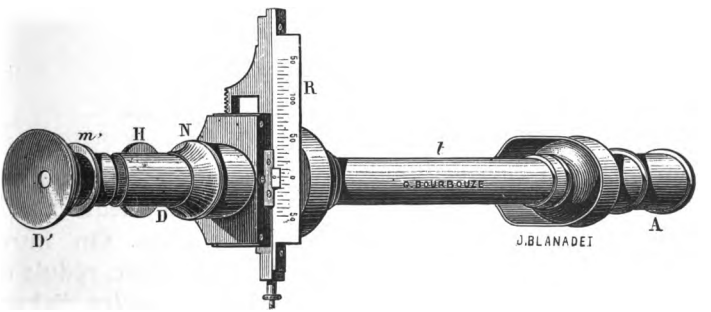


Fig. 154

La graduation de la règle RR′ sur laquelle on lit le nombre

Digitized by Google

qui donne la richesse du liquide en sucre a été obtenue en divisant en cent parties l'intervalle compris entre le point O ou point de départ et le point correspondant à la nouvelle position qu'il doit avoir pour compenser une lame de quartz dextrogyre de 1 millimètre d'épaisseur, placée entre le polariseur et l'analyseur.

La rotation du quartz étant proportionnelle à l'épaisseur, chaque division de l'échelle doit mesurer, par conséquent, le pouvoir rotatoire d'un centième de millimètre de ce quartz, d'où il résulte qu'il sera facile, avant de procéder à cette opération, de vérifier si l'une des divisions de cette échelle correspond bien à l'épaisseur d'une lame de quartz dextrogyre dont on a mesuré l'épaisseur au sphéromètre (*fig. 155*).

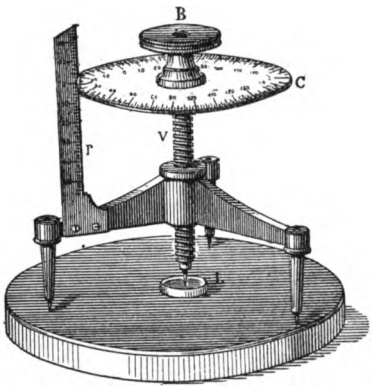


Fig. 155

Application

Une dissolution dans l'eau distillée de 16g,35 de sucre pur et sec occupant un volume total de 100 centimètres cubes et observée dans un tube de 20 centimètres de longueur doit marquer, d'après Clerget, cent divisions sur l'échelle du compensateur. C'est-à-dire que la compensation devra être la même que celle d'un quartz dextrogyre de 1 millimètre d'épaisseur.

Préparation de la dissolution normale

Pour préparer exactement cette dissolution normale, on devra se servir d'un petit matras à col étroit sur lequel on a tracé un trait de jauge à 100 centimètres cubes. On introduit dans ce matras 16g,35 de sucre candi pur et sec, réduit en poudre fine avant la pesée, et que l'on fait dissoudre d'abord dans une certaine quantité d'eau distillée ; on ajoute ensuite de l'eau jusqu'à ce que le niveau du liquide affleure le trait de jauge 100.

Digitized by Google

On aura ainsi un volume bien déterminé de la dissolution normale de Clerget.

Dosage du sucre du commerce : 1° directement; 2° par inversion.

MÉTHODE DE CLERGET

Mode opératoire

Peser 16g,35 de sucre sec réduit en poudre fine, dans un mortier. L'introduire dans le matras jaugé de 100 centimètres cubes. Le faire dissoudre dans une certaine quantité d'eau froide. Ajouter, après dissolution complète, la quantité d'eau nécessaire pour avoir un volume de 100 centimètres cubes de dissolution. Filtrer. Remplir le tube de la solution ainsi préparée, dans le tube de 20 centimètres. Retirer le tube rempli d'eau et lui substituer celui rempli de la dissolution sucrée.

En regardant après cette substitution, on verra que l'uniformité de teinte n'existe plus. On la rétablit en faisant tourner le bouton H du compensateur.

La teinte des deux demi-disques étant bien uniforme pour la teinte sensible, il ne reste plus qu'à lire sur la règle divisée RR' le nombre qui donne en centièmes la richesse du sucre soumis à l'analyse.

On déduit de la formule $x = \frac{16^g,35 \times n}{100}$ la quantité de sucre contenu dans 100 centimètres cubes de la dissolution.

DIABÉTOMÈTRE DE ROBIQUET

POUR MESURER LE SUCRE DANS LES URINES DIABÉTIQUES

Description de l'appareil

La figure 156 représente la disposition de la partie optique du diabétomètre de Robiquet.

Ces pièces sont montées, comme le saccharimètre, dans des garnitures fixées à chaque extrémité du tube disposé, pour cet

Digitized by Google

instrument, en forme de gouttière de manière à placer facilement le tube destiné à recevoir l'urine dont on veut doser le sucre diabétique.

La loupe simple A peut être avancée ou reculée rectilignement, au moyen de sa bonnette *aa'* de manière à pouvoir fixer la vision sur la plaque bi-quartz E.

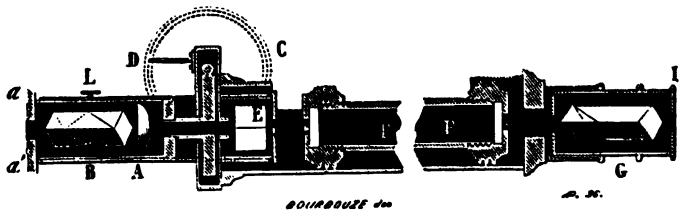


Fig. 156

En B est un prisme de Nicol, faisant fonction d'analyseur; C, cercle gradué pouvant tourner dans un plan vertical et entraîner, dans sa rotation, l'analyseur B. Cette communication de mouvement se fait au moyen d'une vis tangente qui est fixée au centre du cercle, gradué sur son champ; D est une petite tige triangulaire servant de point de repère pour compter les degrés du cercle gradué; E plaque à double rotation, composée de deux demi-disques, ayant chacun une épaisseur de 7‰0 et donnant la teinte bleue-violacée, teinte sensible, lorsque l'appareil est réglé au zéro; F, tube central destiné à recevoir les liquides à analyser.

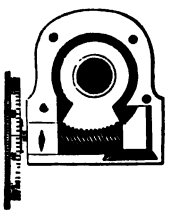


Fig. 157

Il est terminé par deux bonnettes à plans de glace mobiles et un diaphragme métallique se trouve placé dans son intérieur pour régulariser la marche des rayons polarisés.

G est un prisme de Nicol servant de polariseur, I est une bonnette en verre vert pâle pouvant s'enlever à volonté lorsqu'on n'a pas la lumière du jour à sa disposition.

La figure 158 représente le diabétomètre monté sur la boîte SS' servant de pied.

L'appareil fixé sur la boîte SS'_2 on opère de la manière suivante :

Mode opératoire

Placer devant la bonnette I, contenant le polariseur, une lampe. Faire mouvoir, avancer ou reculer, le porte-loupe et

Digitized by Google

l'analyseur de manière à voir très nettement la ligne noire verticale qui partage en deux parties égales la lame bi-quartz.

Amener le zéro du cercle gradué G en regard du point de repère D. Régler la position du prisme analyseur B de telle façon que les deux demi-disques soient d'une égalité de teintes parfaite tirant sur le bleu violacé, qui sera la teinte sensible.

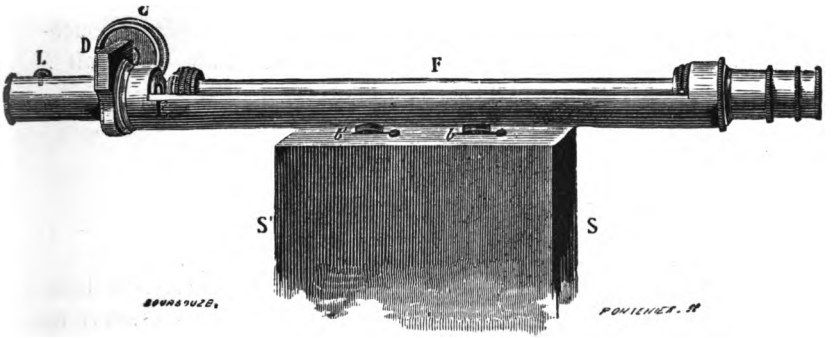


Fig. 158

Pour arriver à placer l'analyseur dans la position normale, il suffit de desserrer la vis L et de faire tourner légèrement à droite ou à gauche, la bonnette *aa'*, jusqu'à ce que l'égalité de teinte soit parfaite. L'index D étant au zéro de la graduation du cercle G, à ce moment on serre la vis L et l'instrument se trouve réglé.

Préparation de la liqueur à analyser

L'instrument ainsi réglé et l'œil de l'opérateur parfaitement exercé à saisir la teinte sensible bleue-violacée, on prépare le liquide à essayer de la manière suivante :

Mode opératoire

Mesurer dans une éprouvette graduée 25 centimètres cubes de l'urine diabétique, ajouter 1 centimètre cube d'extrait de saturne et 1 centimètre cube d'ammoniaque. Compléter exactement avec de l'eau distillée un volume de 50 centimètres [illegible] verser le tout dans un verre à expérience, mêl[illegible] baguette de verre; après quelques minutes de rep[illegible]

Digitized by Google

jusqu'à ce qu'on obtienne une limpidité parfaite. On remplit ensuite le tube F. Pour cela, on dévisse une des deux bonnettes du tube F ; on y verse à petit filet l'urine filtrée et décolorée, de manière à le remplir complètement. Faire glisser le petit disque en glace sur l'extrémité découverte du tube. Après avoir vissé la bonnette de façon à fermer hermétiquement le tube, on s'assure, avant de le mettre en place, qu'il est complètement plein. Dans le cas où il resterait une petite bulle d'air, on le retournerait doucement, puis on dévisserait l'autre bonnette et l'on opèrerait à cette extrémité comme on l'a fait à l'autre.

Dosage du sucre diabétique

Placer le tube sur la gouttière, observer à nouveau la lame bi-quartz éclairée comme précédemment. Si l'urine à essayer ne contient pas de sucre, l'égalité des teintes, donnée par la lame à double rotation n'est pas troublée. Si, au contraire, il y a du sucre diabétique, on constatera que l'identité des teintes n'existe plus ; on la rétablit, en tournant le cercle gradué dans le sens des divisions croissantes, par rapport au rèpère D.

Noter, à ce moment, le degré qui se tient en face de ce point de repère.

L'instrument a été gradué de telle façon, que chaque degré du cercle divisé correspond juste à 1 gramme de sucre de diabète par litre d'urine.

Si, donc, le degré indiqué est 21, cela signifie que l'urine essayée contient 21 grammes de sucre diabétique par litre d'urine.

Si on opère à la lumière naturelle, on enlève la petite lunette munie du verre vert.

SACCHARIMÈTRE LAURENT

La figure 159 représente le saccharimètre à pénombre construit par M. Laurent et que l'on emploie en lumière jaune.

La figure 160 montre le schéma de cet appareil.

Digitized by Google

A est une plaque de bichromate de potasse destinée à ne laisser pénétrer dans l'appareil que de la lumière jaune.

N est un nicol polariseur.

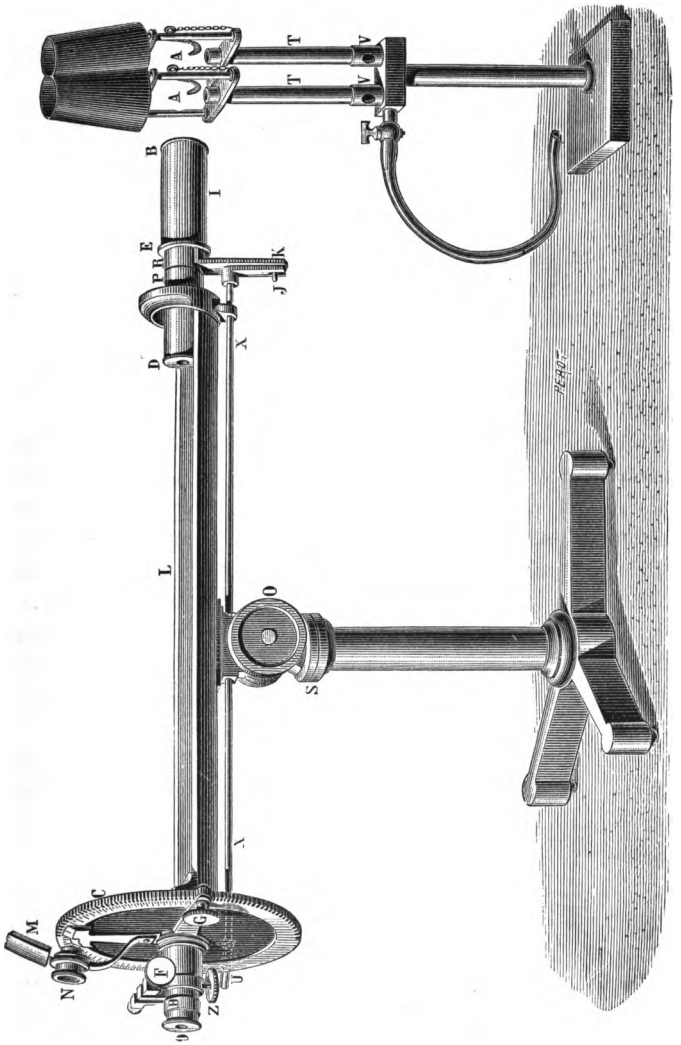


Fig. 159

S un diaphragme recouvert sur une moitié par une plaque de quartz.

T le tube contenant la dissolution sucrée à étudier.

N' le Nicol analyseur.

Digitized by Google

H une lunette de Galilée avec laquelle on voit le diaphragme S.

On voit en K, sur la figure 159, un levier fixé sur le polariseur R et dont le mouvement est limité par un arrêt J.

Si le liquide est peu coloré, le levier est levé jusqu'à l'arrêt. S'il est coloré, on baisse plus ou moins ce levier.

Quand les liquides sont jaunes, mais limpides, on ne met pas

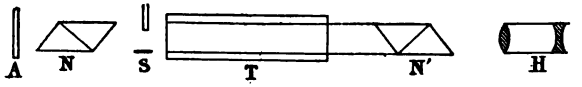


Fig. 160

le bichromate. Il ne sert que lorsque les liquides sont incolores.

En M est un miroir renvoyant sur le cercle gradué en C la lumière des brûleurs à chlorure de sodium.

N est une loupe permettant de lire les divisions.

F est un bouton de réglage maintenu par un ressort antagoniste.

Le cadran porte deux divisions concentriques, celle intérieure, qui correspond au vernier gauche, est en centièmes de sucre. La division 100 correspond à la rotation des rayons jaunes donnés par une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe et ayant une épaisseur de 1 millimètre. Cette rotation est aussi de 21°,40′ dans la division en degrés et minutes du cadran.

16ᵍ,2 de sucre chimiquement pur dissous dans 100 centimètres cubes d'eau donnent une dissolution qui, dans un tube de 20 centimètres, marque 100° sur la division en centièmes de sucre. Chaque division vaut donc 0ᵍ,162 de sucre pur.

La seconde division est faite en demi-degrés. Un vernier donne, lui aussi, des rotations de deux minutes, ce qui permet d'apprécier la minute.

Mode opératoire

On éclaire la bonnette B par un brûleur à chlorure de sodium. On lève le levier K jusqu'à son arrêt et on dirige l'appareil de façon à avoir le maximum de lumière.

Mettant l'œil à l'oculaire, on met celui-ci au point, de façon à avoir nettement l'apparence d'un disque divisé en deux parties par une ligne verticale. C'est sur cette ligne que l'on opère la visée.

Digitized by Google

En général, on n'a pas alors un disque uniformément éclairé, mais la moitié est jaune claire, l'autre jaune grisâtre, comme le représentent les figures *a* ou *c* de la figure ci-contre.

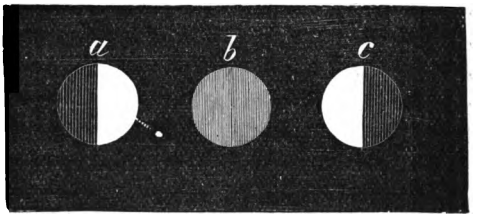


Fig. 161

On amène le zéro du vernier à coïncider exactement avec le zéro du cadran, en agissant sur le bouton G.

Si l'appareil est réglé, les deux moitiés du disque paraissent également éclairées comme en *b*. Dans le cas contraire on ramènera à cette apparence en agissant sur le bouton F.

On pourra vérifier si l'appareil est bien réglé en déplaçant légèrement à droite, puis à gauche le bouton G. L'égalité des teintes n'existe plus. En la reproduisant, on doit faire coïncider de nouveau le zéro du vernier avec le zéro du cadran.

L'appareil est alors réglé.

On interpose le tube rempli de la dissolution sucrée, en prenant pour son remplissage les précautions que nous avons indiquées pour le tube du diabétomètre de Robiquet.

La mise au point n'étant plus la même, on déplace l'oculaire de façon à voir nettement la ligne de séparation des deux moitiés du disque.

Les deux moitiés ne sont plus d'égales teintes. Si l'on a interposé une matière à pouvoir rotatoire droit, tels que le sucre de canne, le sucre de betterave, le sucre de diabète, le glucose, etc., c'est le côté droit qui sera le moins clair, et il faudra tourner le bouton G et par suite l'alidade à droite.

Si la substance a un pouvoir rotatoire gauche, il faudra tourner à gauche.

Supposons que le sucre étudié soit dextrogyre; on tourne le bouton G jusqu'à ce que le demi-disque de droite devienne noir; on continue, il s'éclaircit et l'autre devient noir. On revient en arrière, et après une série de tâtonnements on s'arrête à l'égalité des teintes des deux demi-disques. L'angle dont on a tourné donnera, comme nous l'avons indiqué, la proportion de sucre connue dans la liqueur.

Remarques s'appliquant aux différents saccharimètres

Lorsque le sucre de canne est accompagné d'autres substances

Digitized by Google

ayant une action sur la lumière, on détermine comme précédemment le pouvoir rotatoire, puis on ajoute à la solution un centième de son poids d'acide chlorhydrique fumant et on la chauffe pendant dix minutes à la température de 70°. Le sucre se transforme en deux glucoses, qui forment, par leur ensemble, le sucre interverti qui est levogyre.

On introduit cette dissolution de sucre dans un tube de 20 centimètres et on note, comme précédemment, la déviation du plan de polarisation. Cette fois, il faudra tourner le bouton en sens contraire. On ajoute à la déviation droite la déviation gauche et on multiplie la somme par le nombre 0,736.

Ce nombre 0,736 est le rapport $\frac{K}{K + K'}$,

K désignant le pouvoir rotatoire moléculaire du sucre de canne;

K′ désignant le pouvoir rotatoire moléculaire du sucre interverti.

Digitized by Google

ARGENTURE DU VERRE

Procédé Foucault

Pour argenter les miroirs par ce procédé on devra préparer séparément quatre solutions dans les proportions suivantes :

1°	Eau distillée	100	grammes
	Azotate d'argent cristallisé	4	—
2°	Eau distillée	100	—
	Azotate d'ammoniaque	6	—
3°	Eau distillée	100	—
	Potasse caustique	10	—
4°	Sucre interverti		

Préparation du sucre interverti

Faire dissoudre 25 grammes de sucre dans 250 grammes d'eau distillée. Ajouter 1g,5 d'acide tartrique. Faire bouillir pendant dix minutes environ pour produire ainsi l'inversion du sucre.

Pour éviter ultérieurement la fermentation de cette solution de sucre interverti, on devra y ajouter, après avoir laissé refroidir, 50 centimètres cubes d'alcool pur.

Si les miroirs sont de petites dimensions, on devra, pour éviter la perte de temps qui résulterait en opérant séparément pour chacun d'eux, en coller plusieurs sur un disque de verre avec du baume de Canada.

Cette opération se fait en mettant une petite goutte de baume sur le centre du miroir à coller et appliquant celui-ci sur le disque, préalablement chauffé légèrement.

Pour obtenir une bonne argenture, il faut nettoyer le verre avec le plus grand soin à l'aide d'un tampon de coton cardé im-

Digitized by Google

prégné d'acide azotique pur, puis on le rince à l'eau distillée, on l'essuie après avec un linge fin et bien propre.

Pour terminer ce nettoyage, on verse sur la même surface un mélange de volumes égaux de la solution de potasse n° 3 et d'alcool pur, et on frotte la surface avec un tampon de coton cardé. On plonge ensuite la face ainsi couverte de ce liquide dans une assiette contenant de l'eau distillée.

Il faut avoir soin que la surface du miroir soit au moins à un demi-centimètre du fond, ce que Foucault obtenait en soutenant le miroir avec trois petites cales en bois dur ou, ce qui est préférable, en argent. Enfin on termine cette opération en faisant dissoudre la couche alcaline dans l'eau distillée.

ARGENTURE

Verser successivement dans un verre à pied :

15 centimètres cubes de la solution	d'azotate d'argent	n° 1.
—	d'ammoniaque	n° 2.
—	de potasse	n° 3.
—	de sucre interverti	n° 4.

Verser ce mélange dans une assiette en porcelaine; y porter rapidement le miroir qui était jusqu'à ce moment resté dans l'eau. Le maintenir comme précédemment à 1 demi-centimètre du fond avec de petites cales en argent. Agiter doucement et d'une manière continue jusqu'à ce que le liquide, qui devient trouble et grisâtre, se couvre de plaques d'argent brillant. Retirer le miroir du bain, le laver avec soin dans un filet d'eau courante, terminer avec l'eau distillée; le laisser sécher, en le posant sur champ sur du papier buvard. Une fois sèche, la surface apparaît brillante et recouverte d'un léger voile que l'on enlève facilement à l'aide d'un tampon de peau de chamois, garni de coton cardé, et de rouge d'Angleterre lavé. La couche d'argent déposée à la face postérieure est toujours très brillante; on ne doit donc pas, pour les miroirs d'hygromètres, leur faire subir cette dernière opération, qui serait complètement inutile.

Il existe un autre procédé qui suffit largement pour l'argenture des miroirs ordinaires.

Les bains qui servent pour cette argenture sont :

1° Eau distillée	800 grammes.
Azotate d'argent cristallisé.	10 —

Digitized by Google

Ajouter, après dissolution de l'azotate, de l'ammoniaque jusqu'à ce que le précipité qui se forme ainsi disparaisse presque complètement par agitation; compléter ensuite avec de l'eau distillée pour avoir un volume total de 1600 centimètres cubes.

2° Dissoudre 2 grammes d'azotate d'argent dans une petite quantité d'eau distillée que l'on portera à l'ébullition. Verser cette solution dans un litre d'eau bouillante; ajouter 18,66 de sel de Seignette en maintenant l'ébullition jusqu'à ce que le précipité devienne gris. Filtrer la solution.

Il faut, comme pour le procédé Foucault, nettoyer les verres avec le plus grand soin, d'abord avec de l'acide azotique pur, avec de l'ammoniaque et enfin à l'alcool.

Verser dans un vase à fond plat des parties égales des solutions 1 et 2 en quantités suffisantes pour que le liquide dépasse de quelques millimètres la surface du verre à argenter.

Quand la réduction sera terminée, on lavera, comme il a été dit précédemment et on laissera sécher dans une position inclinée sur du papier buvard.

Digitized by Google

PHOTOGRAPHIE

Avant d'étudier les différents procédés employés pour fixer les images soit sur verre, soit sur papier, nous dirons quelques mots de la formation des images dans la chambre noire.

L'appareil photographique le plus simple est la chambre noire de Porta, sans objectif, dont la paroi antérieure est percée d'un trou circulaire. Les images obtenues au moyen de cette chambre noire n'ont jamais la finesse de celles obtenues avec les chambres à objectif, mais elles sont exemptes de déformation. Nous engageons vivement nos lecteurs à essayer cette manipulation qui permet de faire de la photographie avec un matériel très restreint et peu coûteux. Une simple boîte à cigares peut constituer la chambre noire.

La dimension de l'ouverture n'est pas indifférente. Nous extrayons de l'aide-mémoire de photographie de M. Londe la formule suivante donnée par M. le capitaine Colson :

$$F = \frac{d^2}{0{,}00081 - \frac{d^2}{D}}.$$

où d donne le diamètre de l'ouverture.

F la distance de l'ouverture à la plaque sensible.

D la distance de l'objet à l'ouverture.

Remarque. — L'appareil est dans ce cas toujours *au point* lorsque d est assez petit.

Chambre noire avec objectif

Nous ne nous attarderons pas à décrire la chambre photographique actuellement employée. Elle fait maintenant partie des

Digitized by Google

appareils rentrés dans le domaine public et d'ailleurs sa forme et ses dimensions varient beaucoup suivant les constructeurs ou suivant les usages auxquels elle est destinée.

Nous dirons simplement qu'elle se compose toujours de trois parties.

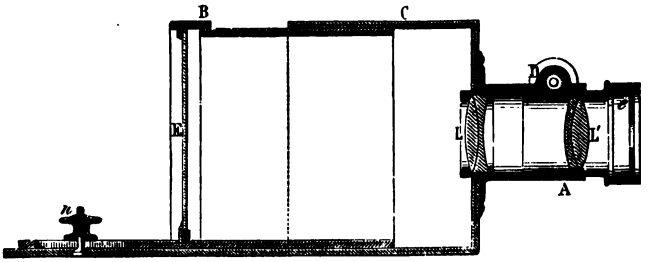


Fig. 162

1° La chambre noire proprement dite, fixe ou à soufflet B C (*fig. 162*).

2° L'objectif, simple ou composé L L'.

3° Le verre dépoli E, sur lequel s'effectuera la mise au point et que l'on remplacera par le châssis contenant la plaque sensible.

De l'objectif

Les objectifs photographiques peuvent se diviser en deux groupes :

1° Les objectifs simples, formés d'un seul système de lentilles.

2° Les objectifs composés, formés de deux ou plusieurs systèmes de lentilles.

L'emploi des systèmes de lentilles, remplaçant une lentille unique est justifié par la nécessité d'obtenir des images achromatiques et aplanétiques.

Achromatisme. — La lumière blanche, en traversant une surface de verre, subit deux modifications :

1° Elle est déviée de sa direction primitive. C'est le phénomène de la réfraction.

2° Elle est décomposée en lumières de différentes couleurs constituant le spectre.

Le problème de l'achromatisme consiste à associer deux verres d'indices différents, de façon à diminuer autant que pos-

Digitized by Google

sible, sinon l'annuler, le second de ces phénomènes, la coloration, tout en laissant au système la propriété de réfracter les rayons lumineux.

On y arrive en associant des lentilles simples, l'une biconvexe, en *crown glass*, l'autre biconcave, en *flint glass* et dont les rayons de courbure ont été convenablement calculés.

Aplanétisme. — L'image d'un point donné par une lentille n'est pas rigoureusement un point. Un système optique est dit aplanétique lorsqu'il donne rigoureusement un point comme image d'un point. En combinant des lentilles dont les surfaces ont été convenablement travaillées, on arrive à avoir des systèmes très sensiblement achromatiques et aplanétiques, du moins pour les rayons qui tombent dans le voisinage du centre. Les rayons qui tombent sur les bords donnent des images légèrement déformées par ce que l'on nomme *l'aberration de sphéricité*. C'est pour éviter cette aberration de sphéricité que l'on fait usage de *diaphragmes*.

On emploie soit des diaphragmes mobiles de différentes grandeurs, soit des diaphragmes fixes à ouvertures variables, tels que le diaphragme iris.

L'emplacement du diaphragme varie suivant le type d'objectif employé et suivant sa construction.

Temps de pose. — Le temps de pose pour un même objectif, toutes choses égales d'ailleurs, varie en raison inverse du carré du diamètre de l'ouverture du diaphragme, c'est-à-dire que si, avec une ouverture de 2 centimètres de diamètre, on trouve qu'il est nécessaire de poser une seconde pour obtenir un certain résultat, avec un diaphragme dont l'ouverture n'a que 1 centimètre de diamètre, il faudra poser quatre secondes pour obtenir le même résultat, dans les mêmes conditions.

Nous dirons tout de suite que pour la reproduction d'objets inanimés, tableaux, gravures, appareils, il y avantage à employer un très petit diaphragme et augmenter par suite le temps de pose. On obtient ainsi une grande finesse et beaucoup de netteté dans les détails.

Le temps de pose varie avec l'objectif employé. Il est *absolument* indispensable, avant de se servir d'un appareil, d'étudier par des essais rationnels le temps de pose nécessaire pour obtenir une bonne épreuve. L'expérience personnelle est, à ce point de vue, préférable à l'emploi de tables empiriques ou même d'appareils photométriques destinés à cet usage.

Digitized by Google

Les essais se feront en tirant successivement plusieurs épreuves d'un cercle blanc se détachant sur fond noir, en variant le temps de pose et l'ouverture du diaphragme.

Nous ne dirons rien ici des appareils à main dont on trouve actuellement tant de modèles différents et dont la manœuvre varie forcément d'un modèle à l'autre.

Dans les appareils à pieds, nous avons indiqué comme troisième partie le verre dépoli auquel sera substitué le châssis contenant la plaque sensible.

Il est bon de tracer au crayon, sur le verre dépoli, des rectangles dont les dimensions sont celles des plaques photographiques 9×12, 13×18, 18×24, etc. Ces rectangles auront d'ailleurs comme milieu le milieu du verre dépoli.

Cette précaution est indispensable pour avoir une mise au point convenable, l'objet à photographier devant occuper le milieu du verre.

Mise au point. — L'opération de la mise au point est des plus délicates et nous engageons vivement les commençants à s'exercer à la faire. Il est bon de s'assurer de l'exactitude de la mise au point au moyen d'une loupe que l'on applique contre le verre dépoli.

De l'image

Quand la mise au point est terminée, on enlève le verre dépoli et on le remplace par un châssis contenant la plaque de verre sensibilisée.

Cette sensibilisation est basée sur l'action de la lumière sur les sels d'argent (chlorure, bromure, iodure).

Un cliché est dit positif lorsque les blancs de l'objet correspondent aux blancs de l'image. Il est dit négatif lorsque les blancs de l'objet correspondent aux noirs de l'image.

Nous ne ferons pas ici l'historique des divers procédés photographiques. Nous citerons seulement comme procédés pratiques le procédé au collodion et celui du gélatino-bromure d'argent.

PROCÉDÉ AU COLLODION

Le procédé au collodion, bien que peu employé à présent par les amateurs, a l'avantage de donner des épreuves d'une grande

Digitized by Google

netteté et des blancs très transparents. De plus, sa mise en pratique constitue une manipulation très intéressante et que nous conseillons beaucoup d'entreprendre avec soin.

Mode opératoire

La première opération consiste à nettoyer les glaces avec le plus grand soin; on arrive à un bon résultat en les passant à l'acide azotique pur; puis, après les avoir lavées à plusieurs eaux, on les essuie avec du linge fin. Quelques instants avant de les employer, on frotte le côté qui doit être collodionné avec un tampon de coton imprégné d'alcool à 90°. Il faut avoir soin, avant de s'en servir, d'enlever avec un blaireau les poussières qui auraient pu s'attacher à la plaque.

Sensibilisation de la plaque. — La plaque étant ainsi nettoyée, il faut maintenant la collodionner et la sensibiliser. On a donné de nombreuses formules pour le collodion et pour le bain sensibilisateur. Nous donnerons seulement ici celle qui a été indiquée par M. Bourbouze et qui donne d'excellents résultats, à condition toutefois de s'en servir avec beaucoup de soins.

Ce collodion, que M. Bourbouze employait pour obtenir directement des positifs sur verre, a la composition suivante :

Ether rectifié non acide	65 gr. »
Alcool à 95°	35 — »
Iodure de zinc	1 — »
Bromure de zinc	0 — 20
Fulmicoton	1 — »

On fait dissoudre dans un flacon très propre l'iodure de zinc et le bromure dans l'alcool, puis on ajoute l'éther. On agite et l'on met alors le coton. On agite de nouveau jusqu'à l'entière dissolution du coton. Vingt-quatre heures après on décante et on filtre.

On étend le collodion ainsi préparé sur la glace, que l'on suspend verticalement par un coin.

Quand l'alcool et l'éther sont évaporés, on plonge la plaque d'un seul coup, sans arrêt, dans une solution de nitrate d'argent contenant :

Eau distillée	100 grammes.
Nitrate d'argent	10 —

Digitized by Google

Cette opération doit se faire dans l'obscurité ou tout au moins à la lumière rouge.

On laisse la plaque dans ce bain pendant une minute, puis on la retire et on la place dans le châssis à glace.

On porte alors ce châssis à la place du verre dépoli sur lequel on a effectué la mise au point. On ouvre le châssis, on enlève l'obturateur devant l'objectif et on laisse l'action de la lumière s'effectuer le temps nécessaire suivant les conditions de l'opération. On remet l'obturateur et on ferme le châssis. On a alors une plaque impressionnée, mais où l'image n'est pas encore visible. Elle est *latente*.

Il faut maintenant *révéler* cette image.

Développement. — On verse sur la plaque (en chambre noire), une solution de sulfate de fer ainsi composée :

Eau	1000	grammes.
Sulfate de fer	100	—
Acide acétique ordinaire	100	centimètres cubes.
Alcool à 90°	50	—
Acide sulfurique	10	—

L'addition de l'acide sulfurique donne des blancs plus métallisés. Lorsqu'on juge l'image suffisamment développée on fixe en versant à la surface une solution à 4 % de cyanure de potassium. Il est préférable, à cause des dangers que présente ce dernier produit, d'employer une solution d'hyposulfite de soude à 10 %.

L'image se *fixe* alors, l'hyposulfite dissolvant les traces des sels d'argent non impressionnés. On lave à grande eau pendant plusieurs heures, puis on laisse sécher.

Renforcement.— Il est souvent nécessaire de renforcer l'épreuve ainsi obtenue.

Pour cela, on trempe l'épreuve dans la solution suivante :

Eau distillée	100	grammes.
Nitrate d'argent	2	—
Alcool	5	—
Acide acétique	5	—

Quand le collodion est bien imprégné de cette dissolution, on fait agir de nouveau la solution de sulfate de fer, puis on lave à grande eau.

Digitized by Google

Quand l'épreuve est sèche, on la vernit avec un vernis bien transparent.

PROCÉDÉ AU GÉLATINO-BROMURE D'ARGENT

Les plaques au gélatino-bromure d'argent se trouvent maintenant très répandues dans le commerce et fabriquées dans d'excellentes conditions qui en assurent la parfaite conservation. Nous n'en décrirons pas la préparation.

Ce que nous venons de dire pour la pose, dans la photographie au collodion, nous le répéterons pour celle au gélatino-bromure, à cela près que ce dernier procédé étant beaucoup plus sensible, la durée de la pose sera très diminuée. On fabrique actuellement des plaques dont la sensibilité est telle qu'on peut obtenir des épreuves parfaites avec des temps de pose excessivement réduits. C'est la photographie dite instantanée, dont les applications ont été si nombreuses dans ces dernières années, grâce aux beaux travaux entrepris sur cette question, notamment au laboratoire de M. Marey.

Développement des plaques au gélatino-bromure d'argent

Les bains de développement sont très nombreux. Dire le meilleur serait fort difficile et de plus très délicat, car nous sommes persuadé que, en pareille matière, l'habitude est le facteur le plus important. En réalité, tous les développateurs donnent de bons résultats, à condition de savoir s'en servir. Nous conseillons de la façon la plus formelle, lorsque l'on se sera habitué à un développateur donné, *de ne pas en changer*. C'est là un défaut de beaucoup d'amateurs d'essayer de nombreuses formules sans s'efforcer de se perfectionner dans l'emploi de l'une d'elles.

Quoi qu'il en soit, nous indiquons quelques formules de développement, laissant le lecteur libre de choisir (1) :

(1) Les formules précédentes sont presque exclusivement empruntées à l'aide-mémoire de photographie de M. Londe. — Paris, J.-B. Baillère et fils.

Digitized by Google

1° *Oxalate ferreux.* — Révélateur énergique, agit rapidement. Donne des clichés à contrastes. Perd son énergie en peu de temps :

A	Oxalate neutre de potasse.	30 gr.	»
	Eau distillée.	100 —	»
B	Sulfate ferreux.	30 —	»
	Eau distillée.	100 —	»
	Acide tartrique.	0 —	50

On prend trois parties de A et une partie de B, en ayant soin de verser B dans A.

2° *Acide pyrogallique.* — Très énergique. A l'inconvénient de tacher les doigts, mais donne des clichés très fins et très détaillés.

On prend :

1° Acide pyrogallique en poudre.

2°	Eau	100	grammes.
	Sulfite de soude pur.	25	—
3°	Eau	100	—
	Carbonate de soude.	30	—
4°	Eau	100	—
	Bromure de potassium	10	—

On met dans un verre à expérience une cuiller à moutarde d'acide pyrogallique; on ajoute 20 centimètres cubes de la dissolution de sulfite de soude, quelques gouttes de bromure et environ 80 centimètres cubes d'eau. On verse le tout dans une cuvette de porcelaine après dissolution de l'acide pyrogallique.

On plonge la plaque dans ce bain pendant une minute; on ajoute graduellement du carbonate de soude jusqu'à ce que les détails soient bien venus uniformément. Si les noirs viennent trop vite, on modère avec quelques gouttes de bromure.

Si, au contraire, il y a manque de pose, on force le développement avec du carbonate de soude.

3° *Hydroquinone.* — Révélateur lent. Donne des images intenses. S'altère en présence de l'air.

Hydroquinone	15	grammes.
Sulfate de soude.	75	—
Carbonate de soude	75	—
Bromure de potassium	Quelques	gouttes.
Eau	1000	grammes.

Digitized by Google

4° *Iconogène.*

Eau	80 grammes.
Iconogène	1 —
Sulfate de soude	4 —
Carbonate de soude	3 —

5° *Amidol.*

Eau	1000 grammes.
Sulfite de soude	50 —
Amidol	5 —

Retardateur. — Bromure de potassium à 10 °/₀.

Accélérateur. — Sulfite de soude à 25 °/₀.

Il existe beaucoup d'autres formules. Nous ne les passerons pas en revue, renvoyant le lecteur à l'ouvrage cité plus haut ou aux ouvrages similaires qui, tous, donnent un grand choix de formules.

Fixage. — Lorsque l'on juge l'image suffisamment développée, il est nécessaire de la fixer, c'est-à-dire de dissoudre le sel d'argent non impressionné par la lumière.

Au sortir du bain révélateur, on lave la plaque et on la plonge dans une dissolution d'hyposulfite de soude à 25 °/₀. Elle se dépouille alors. On attend même quelques instants après qu'elle est complètement dépouillée, puis on la retire et on la lave à grande eau. Il faut avoir soin d'effectuer soigneusement ce travail afin de faire disparaître toute trace d'hyposulfite.

Alunage. — Quand on fait une photographie en été, il est bon d'aluner les plaques en les trempant dans une dissolution d'alun à 10 °/₀. Cette opération durcit la gélatine et de plus la rend imputrescible.

Quand la plaque a été soigneusement lavée, on la laisse sécher naturellement.

Il arrive quelquefois qu'on a besoin d'un séchage rapide. On y arrive en trempant la plaque dans de l'alcool à 90°. Au bout de cinq minutes on retire la plaque, on la laisse égoutter et on peut alors procéder au séchage à une chaleur douce.

Vernissage. — On protège le négatif en le vernissant comme nous l'avons déjà indiqué pour le procédé au collodion.

Digitized by Google

Renforcement des négatifs. — Quand le développement a donné, pour une cause ou pour une autre, un cliché trop faible, il est nécessaire de le renforcer. Pour cela, après l'avoir bien lavé, on le plonge dans une dissolution de bichlorure de mercure à 25 °/₀₀. Le cliché blanchit. On le lave à grande eau, puis on le plonge dans une dissolution d'ammoniaque à 10 °/₀.

Réduction des négatifs. — On prépare :

1° Eau	100	grammes.
Prussiate rouge de potasse	5	—
2° Eau	100	—
Hyposulfite de soude	5	—

On trempe la plaque dans un mélange à parties égales de ces deux dissolutions. On lave ensuite à grande eau.

Tirage des positifs

Le cliché ainsi obtenu constitue un négatif. On peut obtenir, au moyen de ce négatif, des épreuves positives soit sur verre, soit sur papier.

Pour les épreuves sur verre, on prend une plaque sensibilisée, on la place contre le cliché, gélatine contre gélatine, on met les deux plaques dans un châssis-presse, et on expose rapidement à la lumière. On peut aussi poser plus longtemps en employant une bougie ou un bec de gaz placé à une certaine distance du châssis.

Le développement de la seconde plaque se fait comme pour la première.

Epreuves sur papier

On trouve actuellement dans le commerce des papiers sensibilisés de tous formats.

Comme pour les plaques au gélatino-bromure, nous n'indiquerons pas ici la préparation de ces papiers. L'obtention du positif sur papier se compose de trois parties :

1° *L'exposition.* — On met dans le châssis-presse (*fig. 163*) le papier sensible, puis au-dessus le cliché négatif, face en dessous. On expose à la lumière.

Digitized by Google

Le plein soleil ne vaut rien, car il ***brûle*** les épreuves. Quand on veut obtenir des photographies dites dégradées, on fait usage d'écrans percés d'ouvertures convenables dont les bords sont dentelés. On opère à la lumière diffuse.

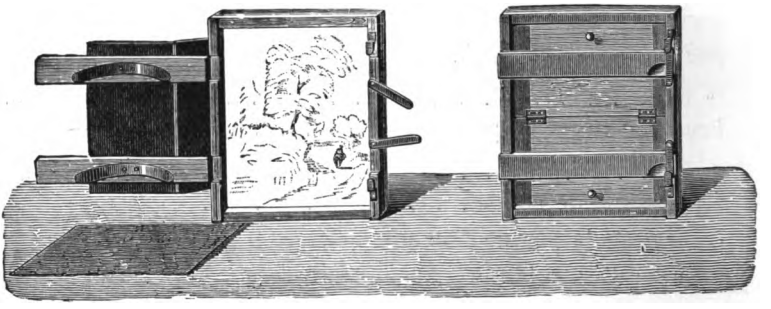


Fig. 163

Il est bon de dépasser un peu le ton que l'on désire obtenir, car dans l'opération suivante, le ton ***baisse*** toujours un peu.

2e *opération.* — *Virage.* — Le virage a pour but de remplacer l'argent réduit, altérable à l'air, par de l'or réduit, qui est inaltérable. Le bain de virage peut varier d'un papier à l'autre, mais un des plus simples et qui peut être le plus généralement employé est le suivant :

Eau distillée.	1000 grammes.
Chlorure double d'or et de potassium . . .	1 —
Craie en poudre.	5 —

Il est bon d'opérer à une température moyenne de 15°.

Remarque. — Généralement, les cahiers des différents papiers que l'on trouve dans le commerce contiennent les formules des bains de virage propres à chacun. Nous conseillons d'en suivre les indications.

3e *opération.* — *Fixage.* — Quand le virage a donné le ton voulu, on trempe l'épreuve pendant quelques instants dans une dissolution à 20 % d'hyposulfite de soude.

On lave ensuite à grande eau pendant plusieurs heures.

Digitized by Google

Autres procédés photographiques

Nous citerons simplement pour mémoire les procédés au platine, au fer, au charbon et les procédés photomécaniques, tels la photolithographie et la photocollographie, renvoyant le lecteur aux ouvrages spéciaux pour les détails sur ces procédés.

AGRANDISSEMENTS PHOTOGRAPHIQUES

Pour faire les agrandissements, on peut procéder de deux manières :

1° On commence par faire un positif sur verre du négatif à agrandir. On fait ensuite à la chambre noire une image agrandie de ce positif pris comme objet. On a ainsi un second négatif agrandi.

2° On projette sur un écran une image agrandie du négatif. On place sur cet écran une feuille de papier sensibilisé au gélatino-bromure d'argent. On obtient ainsi de fort beaux agrandissements. Le papier au gélatino-bromure se développe et se fixe comme les plaques.

Digitized by Google

ACOUSTIQUE

Mesure du nombre absolu de vibrations correspondant à un son donné au moyen de la sirène

Sirène de Cagniard-Latour

Sirène de Bourbouze

Sirène de M. Pellat

La hauteur d'un son dépend du nombre de vibrations effectuées par seconde. La mesure de ce nombre de vibrations peut se faire soit par la méthode graphique, soit au moyen de la sirène.

Nous développerons plus loin la méthode graphique dont nous ferons une application. Nous décrirons pour le moment la sirène.

La sirène de Cagniard-Latour se compose d'une petite caisse cylindrique en laiton dont la partie inférieure se visse sur un tube porte-vent ou s'adapte simplement sur une soufflerie. A la partie supérieure de ce petit cylindre est ajustée une embase destinée à recevoir le mouvement qui sert à compter les révolutions de l'axe. Dans cette embase, on a ménagé une ouverture dans laquelle est encastré un disque percé de trous obliques, disposés régulièrement autour du centre. Un axe en acier, terminé à chaque extrémité en pointe, est réglé par des vis à pivot qui le soutiennent de manière qu'il puisse tourner entre elles avec une très grande mobilité. Cet axe porte à sa partie inférieure un disque percé d'un même nombre de trous en regard des premiers, mais inclinés en sens contraire et également espacés.

Il résulte de cette disposition que l'air, qui s'échappe par les

Digitized by Google

orifices du plateau fixe, frappe obliquement les bords de ceux du disque mobile et imprime à ce dernier, et par suite à l'axe, un mouvement d'autant plus rapide que l'air arrive dans la caisse sous une pression plus considérable.

Les orifices du disque fixe étant alternativement ouverts et fermés par le mouvement de rotation, laissent sortir l'air par intermittence et donnent lieu ainsi à des vibrations qui produisent un son, dont l'acuité ou la gravité dépend de leur nombre pendant l'unité de temps.

Le nombre de vibrations par tour ne dépend que du nombre de trous d'un des plateaux, les deux plateaux ayant d'ailleurs le même nombre de trous.

Un compteur à double cadran embrayé sur l'axe permet de déterminer le nombre de tours et par suite le nombre de vibrations, chaque tour correspondant à 16 vibrations, s'il y a 16 trous par plateau.

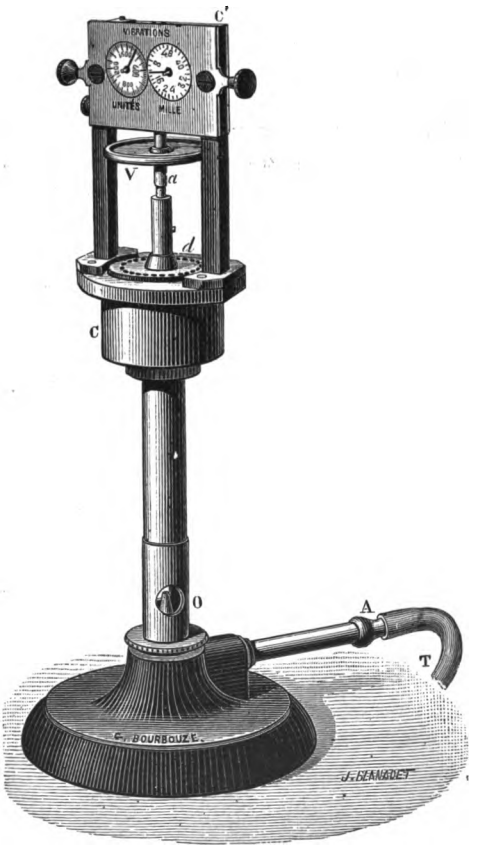


Fig. 164

La figure 164 montre la sirène de Cagniard-Latour, à laquelle M. Bourbouze, comme premier perfectionnement, avait ajouté un volant V. Ce volant permet de maintenir l'instrument un certain temps à l'unisson du son étudié. Il offre, en outre, l'avantage de détruire l'effet de résistance créé par le frottement de la roue dentée du compteur, au moment où on l'engrène sur l'axe.

Digitized by Google

Mode opératoire

Mettre le porte-vent en communication avec le tube qui amène l'air d'un souffleur.

Engrener le compteur.

Donner le vent de façon à amener la sirène à l'unisson du son étudié.

On saisit le moment où l'aiguille du cadran, qui indique les unités, passe au zéro pour mettre en marche l'aiguille d'un chronomètre. On arrête ce chronomètre au moment où l'aiguille du cadran passe pour la n^e fois devant le zéro.

Exemple. — Si l'aiguille du chronomètre a été arrêtée à la cinquantième seconde, au moment où celle du cadran passe pour la troisième fois devant le zéro, le nombre de vibrations est 1600 $\times$ 3 (chaque tour de l'aiguille du cadran correspondant à 100 tours du plateau, soit à 1600 vibrations). Le nombre de vibrations doubles par seconde est donc $\frac{4800}{50} = 96$ ou 192 vibrations simples, ce qui correspond au *sol* de la gamme UT_4.

Modifications de M. Bourbouze

La figure 165 montre l'ensemble des différentes pièces à l'aide desquelles on arrive facilement à maintenir l'unisson d'un son quelconque, pourvu toutefois qu'il ne dépasse pas 2000 vibrations par seconde.

Le tube C qui amène l'air du réservoir est ajusté sur le robinet R, qui permet d'introduire simultanément l'air comprimé dans le manomètre M et dans le tube horizontal qui porte deux appareils à entraînement d'air, l'un (*a*) pour faire parler le tuyau T, l'autre la sirène S. L'aspirateur A qui supporte la sirène se compose d'un tube dont l'extrémité effilée s'engage dans l'axe d'un tube conique à base cylindrique ; sur cette partie cylindrique est ajustée une garniture mobile *o* percée de trous correspondant à ceux que l'on a ménagés dans la base cylindrique qui supporte le

Digitized by Google

cône. On pourra donc, en faisant tourner la garniture mobile *o*, augmenter ou diminuer le volume d'air entraîné et maintenir ainsi facilement la sirène à l'unisson du son étudié.

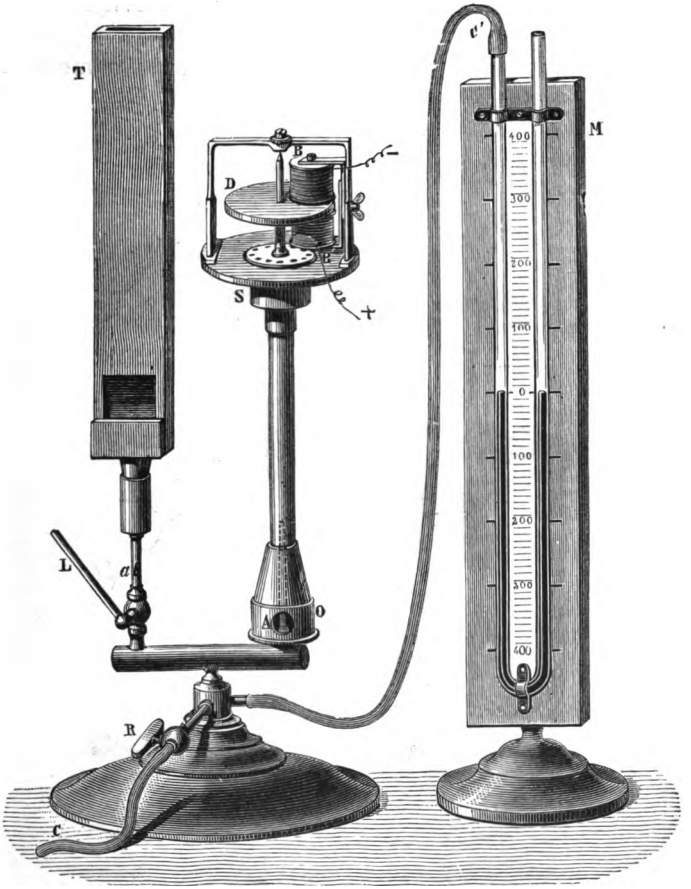


Fig. 165

On voit en B un petit électro-aimant, entre les deux armatures duquel tourne un disque de cuivre rouge monté sur l'axe de la sirène. Lorsqu'on excite l'électro-aimant, le disque s'arrête presque instantanément.

Sirène de M. Bourbouze

La figure 166 représente une sirène comportant un perfectionnement qui permet de régler à volonté la hauteur du son et le

Digitized by Google

ramener par conséquent à une note déterminée. Un pignon à double crémaillère B permet d'approcher ou d'éloigner simultanément les électro-aimants E E′ d'un disque en cuivre rouge et pondérer ainsi l'influence du courant sur le disque mis en mouvement.

L'appareil est muni d'un compteur qui indique, comme dans

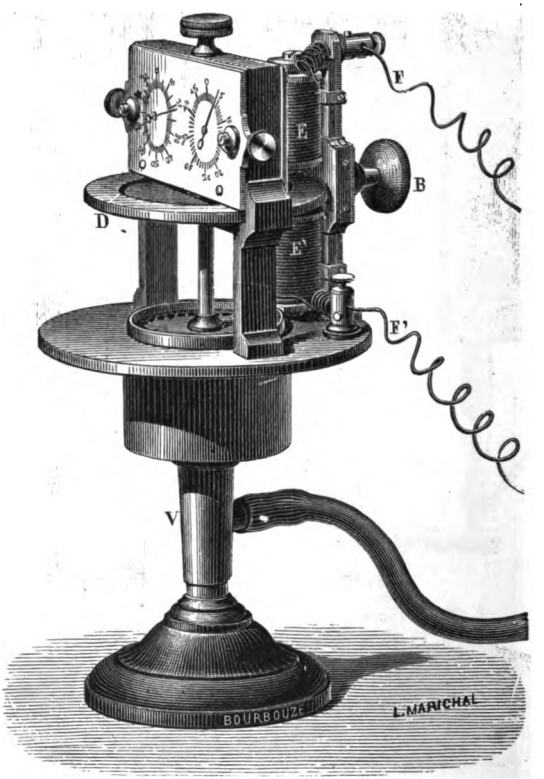


Fig. 166

la sirène de Cagniard, le nombre de tours pendant un temps déterminé. Au moyen d'un bon soufflet d'émailleur, on lance et l'on maintient un courant d'air capable de donner naissance à un son supérieur à celui que l'on veut mesurer.

Dans ces conditions, il suffit de rapprocher au moyen des pignons B les deux électro-aimants jusqu'à ce que l'unisson soit obtenu. On peut facilement ramener le son de 8192 à 128 vibra-

Digitized by Google

tions simples par seconde, en passant par toutes les notes intermédiaires avec la même pression.

Sirène de M. Pellat (1)

La sirène de M. Pellat diffère des sirènes précédentes en ce que les trous sont percés normalement aux plateaux. Ici, l'air insufflé ne produit plus le mouvement, mais seulement le son.

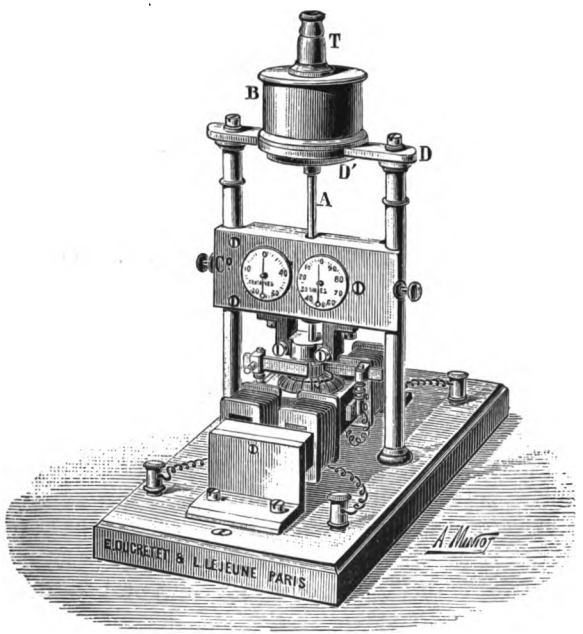


Fig. 167

L'organe moteur est une petite dynamo Gramme dont l'anneau est porté par l'axe même de rotation, A, du plateau mobile. La hauteur du son ne dépend plus de la pression de l'air, l'intensité seule en dépend. On peut donc à volonté faire varier l'une ou l'autre de ces deux qualités. Un frein électro-magnétique

(1) *Journal de Physique*. 2e série, tome IV. Août 1895.

Digitized by Google

analogue à celui employé par M. Bourbouze permet d'obtenir un mouvement de rotation bien uniforme et aussi de passer rapidement d'une vitesse constante à une autre vitesse constante. A cet effet, on dispose dans le circuit des électro-aimants du frein un rhéostat.

Cette disposition permet d'obtenir des sons d'une hauteur remarquablement fixe et de mettre rapidement la sirène à l'unisson d'un son donné.

Une remarque importante est que les sons graves se produisent avec autant de netteté que les sons aigus. Enfin, la sirène de M. Pellat supprime complètement les souffles si gênants qui se produisaient dans les autres modèles.

SONOMÈTRE

Détermination du nombre absolu de vibrations correspondant à un son donné à l'aide du sonomètre

Mode opératoire

Amener la corde du sonomètre à l'unisson d'un diapason ut_2 donnant 256 vibrations par seconde. Faire glisser le chevalet mobile sous cette corde, en appuyant légèrement le doigt sur le point qui touche au chevalet, de façon à trouver la longueur qui convient pour obtenir l'unisson du son dont on veut déterminer le nombre de vibrations; consulter l'échelle métrique pour en avoir la longueur.

Le nombre de vibrations étant inversement proportionnel aux longueurs des cordes, on aura :

$$\frac{l}{1000} = \frac{n}{256} \qquad \text{d'où } n = \frac{256000}{l}.$$

Le tableau suivant donne les nombres de vibrations et les longueurs des cordes correspondant aux différentes notes de la gamme chromatique vraie et aux principales harmoniques, le son fondamental étant ut_2.

Digitized by Google

NOMBRE ABSOLU DE VIBRATIONS DE CHAQUE NOTE

UT_2	$UT^{\#}$	$RÉ^{\flat}$	RÉ	$RÉ^{\#}$	$MI^{\flat}$	MI	$FA^{\flat}$	$MI^{\#}$	FA	$FA^{\#}$	$SOL^{\flat}$	SOL	$SOL^{\#}$	$LA^{\flat}$	LA	$LA^{\#}$	$SI^{\flat}$	SI	$UT^{\flat}$	$SI^{\#}$	UT
256	266	276,44	288	300	307,2	320	327	333	341	355,2	369	384	400	409,5	426,6	444,3	460,8	480	491,5	500	512
Longueur des cordes																					
1000	962	827,5	888	853,3	833,3	800	782,3	768,7	750	720	693,7	666,6	640	625	600	576	555,5	533,3	520,8	512	500

HARMONIQUES

Nombre absolu de vibrations de chaque harmonique (Le son fondamental étant ut_2) :

UT_2	UT_3	SOL_3	UT_4	MI_4	SOL_4	UT_5
256	512	768	1024	1280	1536	2048
Longueur des cordes						
1000	500	333	250	100	166,6	125

Digitized by Google

Vérification au moyen du sonomètre des lois des cordes vibrantes

1° *Le nombre de vibrations d'une corde est inversement proportionnel à sa longueur.*

L'expérience précédente est une vérification de cette loi.

2° *Les nombres de vibrations sont proportionnels aux racines carrées des poids tenseurs.*

Mode opératoire

On tend une corde par un poids de 1 kilogramme ; on obtient un certain son et par suite un certain nombre de vibrations. En tendant la corde pour un poids 4, 9, 16 fois plus grand, on obtient des nombres de vibrations 2, 3, 4 fois plus grands.

3° *Le nombre des vibrations varie en raison inverse du diamètre de la corde.*

On installera sur le sonomètre deux cordes également longues et également tendues, mais de diamètres différents d et d'. On constatera que les nombres de vibrations n et n' sont tels que

$$\frac{n}{n'} = \frac{d'}{d}.$$

4° *Le nombre des vibrations est inversement proportionnel à la racine carrée de la densité de la corde.*

On installera sur le sonomètre deux cordes, l'une de platine, l'autre de fer, par exemple, de même longueur, de même diamètre et tendues par des poids égaux. On constatera que les nombres de vibrations n et n' de ces deux cordes sont tels que l'on a :

$$\frac{n}{n'} = \frac{\sqrt{d'}}{\sqrt{d}},$$

d et d' étant les densités des deux fils.

Dans le cas qui nous occupe, on aura :

$$\frac{n}{n'} = \frac{\sqrt{7,8}}{\sqrt{21,5}}.$$

Digitized by Google

MÉTHODE GRAPHIQUE

La méthode la plus précise pour déterminer le nombre de vibrations d'un son dans un temps donné, consiste à faire inscrire, au corps lui-même, ses vibrations.

Mode opératoire

Si le corps vibrant est une lame ou un diapason, on fixe à son extrémité une petite lame métallique très fine ou mieux un crin rigide. On place ce crin devant un cylindre enduit de noir de fumée et mû soit à la main, soit par un mouvement d'horlogerie (Tambour Marey).

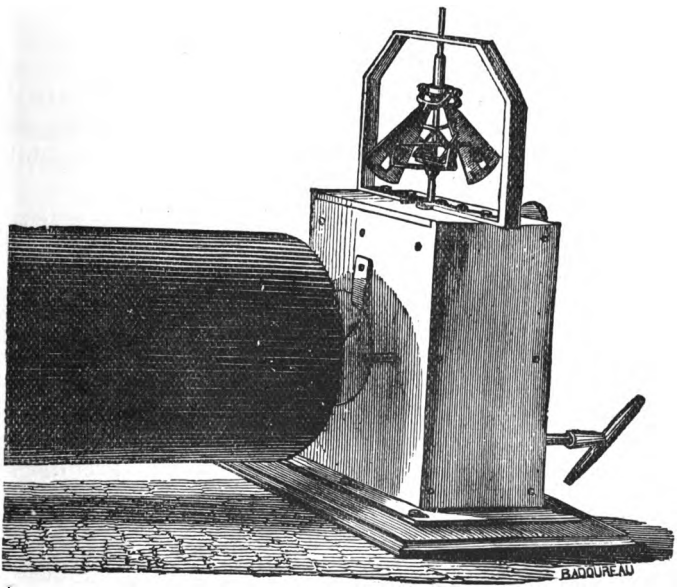


Fig. 168

Pour mesurer le temps, on se servira d'un compteur à secondes, dit chronomètre à pointage, ou mieux encore, on

Digitized by Google

s'arrangera de façon à installer à côté du corps vibrant, un contact faisant partie d'un circuit électrique qu'un pendule, convenablement disposé, interrompt à des intervalles réguliers.

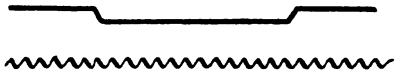


Fig. 169

La figure montre les vibrations d'un diapason à côté des marques du contact électrique (Voir *Mesure du temps*).

LOIS DE BERNOUILLI (1)

Vérifications expérimentales

1° Un tuyau ouvert peut rendre une série de sons dont les nombres de vibrations sont entre eux comme 1, 2, 3, 4, 5..... c'est-à-dire comme la série complète des harmoniques naturels.

Mode opératoire

On prend un tuyau long et étroit et on y envoie de l'air sous pression croissante; les sons se succèdent en suivant très sensiblement la série harmonique. Si le tuyau est fermé, on n'obtient que les termes impairs.

2° La hauteur d'un son est en raison inverse de la longueur du tuyau.

Comme vérification expérimentale, on prendra une série de tuyaux donnant la gamme.

3° Le son fondamental a pour longueur d'onde, dans un tuyau ouvert, le double de la longueur du tuyau, et dans un tuyau fermé, quatre fois la longueur du tuyau.

On fait rendre à un tuyau ouvert le son fondamendal; en le bouchant on constate qu'il donne l'octave grave du premier son.

Étude des nœuds et des ventres. — On étudiera la position des nœuds et des ventres, soit au moyen d'une membrane recouverte de sable, soit au moyen des flammes manométriques de Kœnig.

(1) D. Bernouilli, *Mémoires de l'Académie des Sciences*, année 1762, p. 451.

Digitized by Google

ÉLECTRICITÉ

Nous avons dû faire un choix parmi les manipulations d'électricité réalisables dans un laboratoire et n'exigeant pas des connaissances trop étendues en électricité.

Nous avons d'abord écarté systématiquement toutes les expériences qui, ne réalisant pas, à proprement parler, une manipulation de mesure ou de montage d'appareils, rentraient plutôt dans la catégorie des expériences de cours, nécessitant les explications théoriques du professeur. C'est le cas des expériences d'électricité statique, de l'étude expérimentale des phénomènes d'induction, de l'étude des machines électro-statiques et des machines d'induction.

Dans les figures relatives aux montages d'appareils, il est d'usage d'employer certains signes conventionnels. Le tableau suivant en indique quelques-uns.

Signes conventionnels

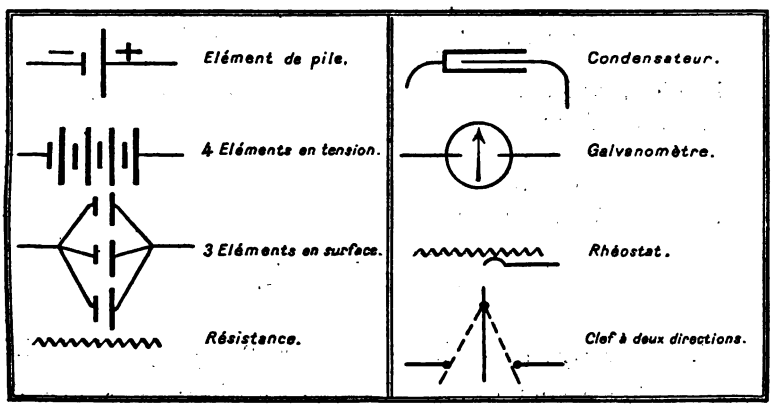


Fig. 170

Digitized by Google

UNITÉS ÉLECTRIQUES

Nous avons indiqué au commencement de cet ouvrage l'emploi des unités de système C G S (centimètre, gramme-masse, seconde).

Les *unités électromagnétiques* se déduisent de ces unités fondamentales par l'application de formules établies en électricité et sur le détail desquelles nous ne pouvons pas insister ici.

Dans la pratique, on a adopté, pour la commodité des mesures, des unités qui sont, soit des multiples, soit des sous-multiples des unités C G S, et auxquelles on a donné des noms particuliers, rappelant les noms de savants qui se sont occupés des questions d'électricité.

L'unité pratique d'*intensité* est l'*ampère*. Elle est égale à $\frac{1}{10}$ de l'unité C G S d'intensité.

L'unité pratique de *quantité* est le *coulomb*. Elle est égale à $\frac{1}{10}$ de l'unité C G S de quantité.

On emploie aussi une autre unité pratique beaucoup plus grande. C'est l'*ampère-heure*, qui est la quantité d'électricité qui traverse un circuit pendant une heure lorsque l'intensité est de 1 ampère.

$$1 \text{ ampère-heure} = 3600 \text{ coulombs}.$$

L'unité pratique *de force électro-motrice* est le *volt*, qui vaut 100,000,000 de fois l'unité C G S.

L'unité pratique de résistance est l'*ohm*, qui vaut 1,000,000,000 de fois l'unité C G S.

La loi d'*Ohm* donne entre l'ampère, le volt et l'ohm la relation

$$1 \text{ ampère} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ohm}}.$$

L'unité de *capacité* est le *farad*, qui vaut $\frac{1}{1,000,000,000}$ de l'unité C G S. C'est encore une unité trop grande. Aussi se sert-on du *microfarad*, qui en est la millionième partie.

Digitized by Google

MONTAGE DES PILES

Piles à un seul liquide

Parmi les piles à un seul liquide, nous décrirons comme pile à dépolarisant liquide la pile au bichromate, et comme pile à dépolarisant solide la pile Leclanché.

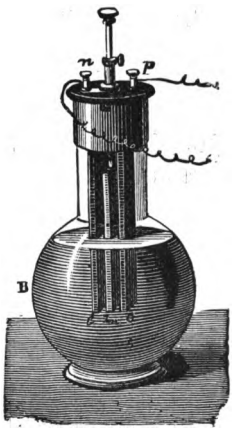


Fig. 171

Pile au bichromate. — Le liquide consiste en une solution saturée de bichromate de potasse additionnée d'acide sulfurique.

Eau	900	grammes.
Bichromate de potasse.	92	—
Acide sulfurique. .	94	—

La pile est constituée par un vase de verre contenant ce liquide. Ce vase est fermé par une plaque d'ébonite à laquelle sont attachées deux plaques de charbon de cornue qui plongent constamment dans le liquide et qui constituent le pôle positif de la pile. Une lame de zinc amalgamé, qu'on peut élever ou abaisser par un bouton ménagé à cet effet, passe entre les deux lames de charbon, et suivant qu'on l'abaisse ou qu'on la relève, plonge ou non dans le liquide.

En circuit fermé (1) il se produit un sulfate double de chrome et de potassium avec dégagement d'oxygène qui brûle l'hydrogène et empêche ainsi la polarisation des électrodes.

---

(1) On dit qu'un générateur d'électricité est en circuit fermé lorsque les deux pôles sont réunis soit directement, soit par l'intermédiaire de conducteurs quelconques, solides ou liquides, et qui peuvent être le siège de phénomènes électriques, thermiques, lumineux ou chimiques.

Digitized by Google

La force électro-motrice de la pile au bichromate varie de 1, 8 à 2 volts.

La forme bouteille prend le nom de pile Grenet (*fig. 171*). Parmi les piles à un seul liquide et à dépolarisant liquide, nous citerons sans les décrire celle de MM. Trouvé, Gaiffe, Ducretet, Renard, etc.

Piles à dépolarisant solide

Dans ces piles, le développement de l'hydrogène est empêché en le fixant chimiquement sur une substance en contact avec le pôle positif.

Nous citerons les piles Becquerel, De la Rive, Warren de la Rüe, Lalande et Chaperon.

Nous décrirons la pile Leclanché (*fig. 172*)

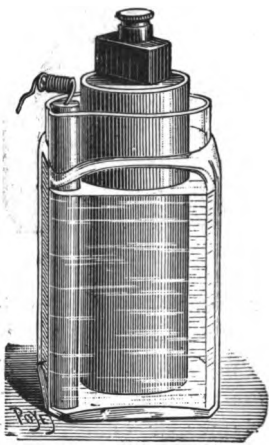


Fig. 172

Le pôle positif est une plaque de charbon qui est entourée d'un mélange pâteux de peroxyde de manganèse et de charbon de cornue. Le pôle négatif est formé par une tige de zinc.

Quand on veut mettre la pile en activité, on verse dans le vase qui contient les deux électrodes une dissolution saturée de chlorhydrate d'ammoniaque. Lorsqu'on ferme le circuit le zinc est attaqué par le chlorhydrate, il se forme du chlorure de zinc, qui est soluble. Lorsque le chlorhydrate est épuisé, il se forme de l'oxyde de zinc et l'on est prévenu par l'aspect laiteux que prend la dissolution. Le peroxyde de manganèse est réduit par l'hydrogène dégagé et il se forme du sexquioxyde de manganèse.

Dans les anciens modèles de pile Leclanché, le mélange de sel de manganèse et de charbon était contenu dans un vase poreux. On a supprimé ce vase. Le mélange cité est comprimé à haute pression et accolé à la lame de charbon.

Le grand avantage de l'élément Leclanché est de ne rien dépenser en circuit ouvert.

La *force électro-motrice* est environ 1,48.

Digitized by Google

La *résistance intérieure* de la pile est comprise entre 1 et 2 ohms.

Piles à deux liquides

Le type le plus ancien de la pile à deux liquides est l'élément Becquerel, à laquelle le physicien anglais Daniell a donné une forme pratique.

Pile Daniell. — L'élément Daniell se compose d'un vase en verre renfermant de l'eau acidulée sulfurique à 10 %, une lame de zinc amalgamé et un vase poreux dans lequel on met une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Dans ce vase poreux plonge le pôle positif constitué par une lame de cuivre. A la partie supérieure du vase poreux, on place un petit panier également en cuivre contenant des cristaux de sulfate de cuivre destinés à entretenir la saturation de la dissolution. Il se forme du sulfate de zinc, et le cuivre réduit vient se déposer sur la lame de cuivre.

NOTE. — *Amalgamation du zinc.* — On commence par décaper soigneusement en plongeant la lame pendant quelques minutes dans de l'eau additionnée d'acide sulfurique (10 % en volume). Lorsque le zinc est bien propre, on le plonge dans une cuvette contenant du mercure, en ayant soin que toutes les parties de la lame soient mises au contact du mercure et on frotte la lame dans le mercure.

Cette opération doit se faire au moment même de monter la pile et doit être recommencée chaque fois.

La force électro-motrice de l'élément Daniell est environ 1,08.

La pile Daniell a subi de nombreuses modifications. Les principales tendent à la suppression du vase poreux.

Pile Meidinger. — Le vase extérieur est un bocal en verre. Le pôle positif est constitué par une petite spirale de cuivre plongeant dans la solution de sulfate de cuivre, contenue dans un petit gobelet de verre placé au fond du bocal, et dans lequel plonge également le gobelet d'un ballon renversé, contenant des cristaux de sulfate de cuivre.

Le pôle négatif est constitué par une lame de zinc en forme de

Digitized by Google

spirale qui s'arrête à mi-hauteur du bocal et est baignée par une solution de sulfate de zinc.

Pour mettre l'élément en activité, on commence par remplir à moitié le vase d'une solution de sulfate de zinc à 5 %. Puis, à l'aide d'un entonnoir dont la queue plonge jusqu'au fond du vase, on verse lentement la solution de sulfate de cuivre. Celle-ci, plus dense, reste au fond et fait remonter la solution de sulfate de zinc jusqu'au contact de la lame de zinc.

Pile Callaud. — L'élément Callaud repose sur le même principe que le précédent. Le pôle positif est un petit cylindre de cuivre relié à l'extérieur par un fil de cuivre recouvert de gutta-percha. Le pôle négatif est un cylindre de zinc suspendu aux bords du vase par des crochets de cuivre.

Ces deux éléments, dont la force électro-motrice varie entre 1 et 1,10, peuvent fournir des courants sensiblement constants pendant très longtemps, en ayant soin de renouveler de temps en temps la solution supérieure, qui tend à se saturer de plus en plus.

Pile Bunsen. — La pile Bunsen, malgré ses inconvénients, qui sont le peu de constance de cet élément et surtout les émanations désagréables qu'elle produit, est encore l'une des plus employées dans les laboratoires, lorsqu'il s'agit de produire un courant intense pendant quelques heures.

L'élément Bunsen se compose :

1° D'un vase de grès contenant de l'eau acidulée sulfurique à 5 %, dans laquelle plonge un cylindre creux de zinc amalgamé qui constitue le pôle négatif.

2° Un vase poreux en terre de pipe, où l'on verse de l'acide azotique ordinaire dans lequel plonge une lame de charbon de cornue qui constitue le pôle positif.

A la lame de zinc et au charbon, sont posées des bornes de cuivre auxquelles on attachera les fils conducteurs.

En circuit fermé, l'eau acidulée est décomposée par le zinc en donnant du sulfate de zinc. L'hydrogène dégagé dans cette réaction, réduit le dépolarisant, qui est ici l'acide azotique, ce qui donne lieu à la production de vapeurs nitreuses, qui rendent si désagréable l'emploi de la pile Bunsen.

Au commencement de sa mise en activité, la force électro-motrice de l'élément Bunsen est 1,8, mais elle baisse rapidement lorsque la dissolution nitrique s'épuise.

Digitized by Google

PILES ÉTALONS

Les principaux types de piles étalons sont :

1° L'étalon Daniell Fleming ;

2° L'étalon Gouy ;

3° L'étalon Latimer-Clark ;

4° L'étalon du Post-Office de Londres, du type Daniell.

Nous décrirons seulement l'étalon Gouy et l'étalon Latimer-Clark dont la construction est facile à réaliser dans un laboratoire.

Étalon Gouy (*fig. 173*). — Cet élément est formé de zinc, sulfate de zinc, mercure et bioxyde de mercure. Tous ces produits doivent être chimiquement purs.

On prend un petit flacon à deux tubulures au fond duquel on met du mercure en couche de 2 à 3 centimètres ; un fil de platine scellé dans un tube de verre et plongeant dans ce mercure constitue le pôle positif.

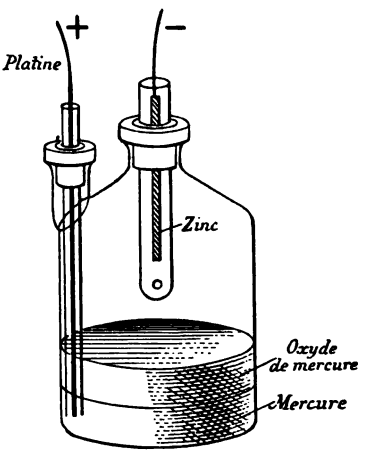


Fig. 173

Au-dessus du mercure, on met une couche mince d'oxyde de mercure, puis au-dessus, on remplit le flacon de la dissolution de sulfate de zinc de densité 1,06 (à 10 °/₀). La tubulure centrale laisse passer un tube à essai percé d'un petit trou et contenant un petit cylindre de zinc amalgamé.

La force électro-motrice de l'élément Gouy diminue quand la température s'élève. La correction de température est très faible dans les conditions normales de température ; aussi peut-on prendre comme valeur pratique de la force électro-motrice le nombre 1,39.

Digitized by Google

Étalon Latimer-Clark. — La forme la plus commode et la plus pratique de cet élément est la forme en H (*fig. 174*).

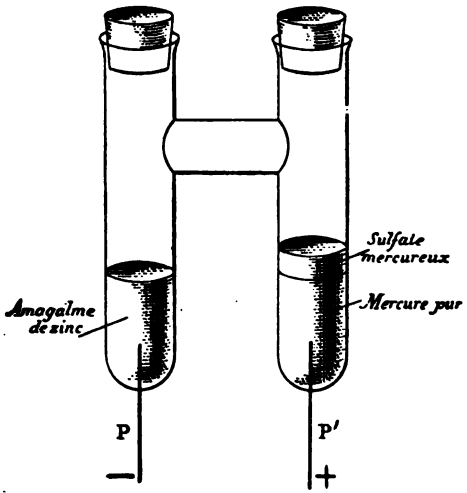


Fig. 174

L'une des branches de l'H contient un amalgame de zinc pur dans du mercure pur distillé.

L'autre branche renferme du mercure pur surmonté de sulfate mercureux.

Les deux tubes sont ensuite remplis d'une solution saturée de sulfate de zinc pur. Les tubes sont fermés par des bouchons paraffinés. Deux fils de platine P et P', soudés dans le verre, servent d'électrodes.

La force électro-motrice de cet élément est également variable avec la température.

A 15° elle est de 1,438.

A une température quelconque θ, elle est donnée par la formule

$$E\theta = 1{,}438\ [1 - 0{,}0077\ (\theta - 15)]$$

Digitized by Google

GROUPEMENT DES ÉLÉMENTS DE PILE

Association en tension ou en série

Dans ce mode de groupement, on réunit le pôle positif de chaque pile au pôle négatif de la suivante.

Les extrémités de la chaîne ainsi formée sont constituées par le pôle négatif du premier élément et par le pôle positif du dernier.

Appelons R la résistance extérieure du circuit.

— E la forme électro-motrice de chaque élément.

— r la résistance intérieure — —

L'intensité du courant est donnée par la formule

$$i = \frac{nE}{nr + R} = \frac{E}{r + \frac{R}{n}}$$

n étant le nombre d'éléments.

Il y aura avantage à grouper ainsi les éléments quand la résistance intérieure r sera négligeable vis-à-vis de la résistance $\frac{R}{n}$.

La figure 175 montre 6 éléments associés en série.

Association en quantité ou en surface

On réunit ensemble tous les pôles positifs et de même tous les pôles négatifs. On n'a en définitive qu'un seul pôle positif et un seul pôle négatif. Avec les mêmes notations que précédemment, l'intensité du courant sera donnée par la formule

$$i = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}.$$

Digitized by Google

On emploiera ce groupement quand la résistance R sera négligeable vis-à-vis de $\frac{r}{n}$.

Dans les cas intermédiaires, on pourra former plusieurs groupes d'éléments en tension et réunir ces éléments en quantité.

Les figures 175, 176, 177, 178 montre les différents groupements que l'on peut former avec six éléments montés :

1° Tous en série

$$i = \frac{6\,E}{6r + R}$$

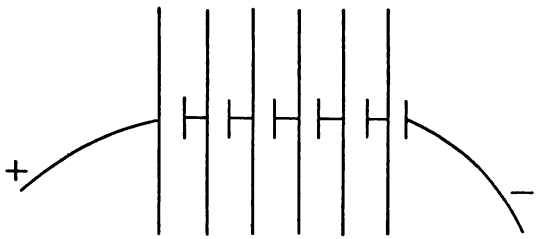


Fig. 175

2° Deux groupes en surface de trois éléments en tension

$$i = \frac{3\,E}{\frac{3}{2}r + R}$$

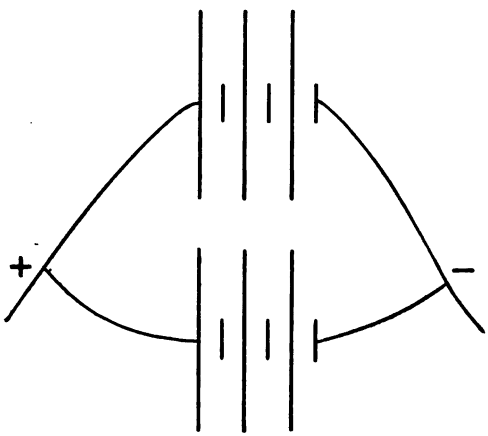


Fig. 176

Digitized by Google

3° Quatre groupes en surface de deux éléments en tension

$$i = \frac{2E}{\frac{2}{4}r + R}$$

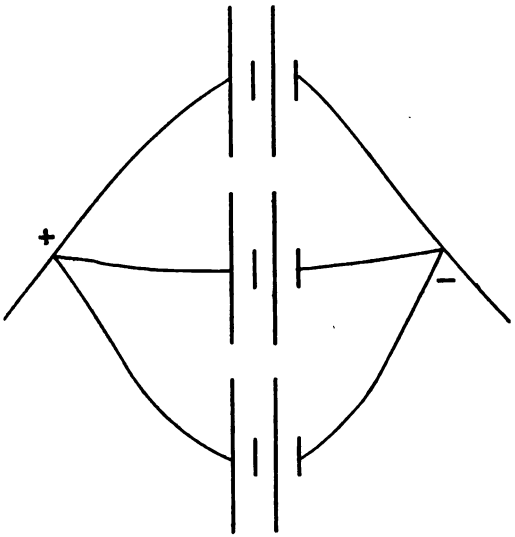


Fig. 177

4° Six éléments en surface

$$i = \frac{E}{\frac{r}{6} + R} \text{ (1).}$$

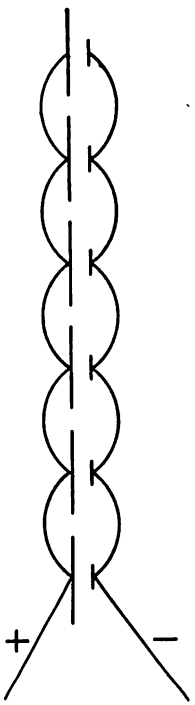


Fig. 178

Digitized by Google

Dans chaque cas particulier, il faudra coupler les éléments suivant l'usage auquel on les destine. Si l'on a besoin d'une force électro-motrice élevée, la résistance extérieure étant très grande, on prendra le groupement en série. Si au contraire, la résistance extérieure est faible et qu'on veuille avoir un courant intense, on prendra le groupement en surface.

Dans les cas intermédiaires, on pourra déterminer le groupement par la condition que les éléments travaillent à puissance utile maxima, en appelant puissance utile le produit $e\,\mathrm{I}$ de la différence de potentiel aux bornes par l'intensité du courant.

La théorie de la pile montre que pour réaliser cette condition, il faut que la résistance intérieure soit égale à la résistance extérieure, condition dont on devra toujours chercher à s'approcher.

---

(1) D'une façon générale, si on a n éléments groupés en p groupes en surface, chaque groupe contenant q éléments en tension, on a, n étant égal à $p \times q$:

$$i = \frac{\frac{q\mathrm{E}}{qr}}{\frac{}{p} + \mathrm{R}} = \frac{pq\mathrm{E}}{qr + p\mathrm{R}} = \frac{n\mathrm{E}}{\frac{qr}{} + p\mathrm{R}}$$

Digitized by Google

MESURE DE LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

AUX BORNES D'UNE PILE PAR L'ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS

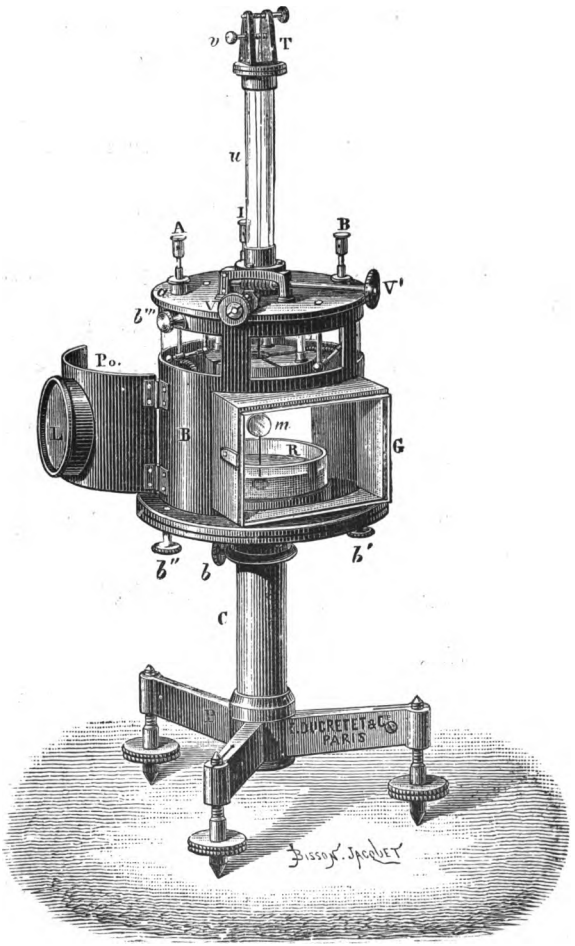


Fig. 179

Digitized by Google

Électromètre à quadrants. — L'électromètre à quadrants dont on trouve dans les laboratoires plusieurs formes, telles que l'électromètre Thomson, l'électromètre Mascart, etc., se compose toujours d'une aiguille légère généralement en aluminium, en forme de ∞, mobile entre deux paires de quadrants isolés les uns des autres, et reliés en diagonale. A l'état de repos, l'aiguille est placée symétriquement par rapport aux deux paires de quadrants. Cette aiguille est suspendue soit par un seul fil, soit par une suspension bifilaire portant un miroir *m* (*fig. 179*). On observe la rotation du système par une des méthodes que nous avons déjà indiquées, soit au moyen de la méthode objective, soit par la méthode subjective (Voir page 27).

Les quadrants nos 1 et 2, reliés entre eux, communiquent à une borne A placée sur la monture extérieure de l'appareil.

Les quadrants 2 et 4 communiquent de même avec une borne B.

En mettant les bornes A B en relation avec les deux pôles d'un générateur d'électricité quelconque, une pile, par exemple, on porte l'une des paires des secteurs à un potentiel V_1, l'autre à un potentiel V_2.

On peut, soit au moyen d'une borne, soit par l'intermédiaire d'un liquide conducteur (électromètre Mascart), mettre de même l'aiguille en relation avec le pôle positif d'une pile dont le pôle négatif est en communication avec le sol. Soit V le potentiel de l'aiguille dans ces conditions, soit α la déviation de l'aiguille de l'électromètre.

On démontre que α est liée aux quantités $V V_1 V_2$ par la relation :

$$\alpha = K (V_1 - V_2) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right].$$

K étant une constante.

Mode opératoire

Deux méthodes pour se servir de l'électromètre à quadrants.

Première méthode. — On met la première paire de quadrants en relation avec le pôle positif d'une pile *étalon*, la deuxième paire étant en relation avec le pôle négatif.

On met l'aiguille en relation avec le pôle positif d'un grand nombre d'éléments (pile de charge) dont l'autre pôle est à la

Digitized by Google

terre. Alors $\frac{V_1 + V_2}{2}$ en très petit et tout à fait négligeable vis-à-vis de V, on a simplement :

$$\alpha = K V (V_1 - V_2).$$

Pour mesurer une différence de potentiel aux bornes d'un élément considéré, on le met à la place de l'étalon. Les quadrants sont alors portés (deux à deux) à des potentiels V'_1 et V'_2. On observe une déviation α',

$$\alpha' = K V (V'_1 - V'_2),$$

V n'ayant pas changé.

d'où $$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{K V (V'_1 - V'_2)}{K V (V_1 - V_2)} = \frac{V'_1 - V'_2}{V_1 - V_2}.$$

Les différences du potentiel à mesurer sont donc proportionnelles aux déviations observées, *à condition que celles-ci ne soient pas trop grandes.*

Deuxième méthode. — On peut mettre l'aiguille en communication avec le pôle positif de la pile étudiée, dont le pôle négatif est en communication avec le sol. On relie ensuite la première paire de quadrants avec le pôle positif d'une pile de charge, la seconde paire avec le pôle négatif, le milieu de cette pile étant au sol. Alors V est la différence du potentiel à mesurer.

De plus, $V_2 = - V_1$, et on a simplement

$$\alpha = 2 K V V_1,$$

Pour un autre élément, on aurait, en procédant de même :

$$\alpha' = 2 K V_1 V'.$$

Ici V_1 en constant, V variable;

d'où $$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{V'}{V}.$$

Exemple numérique. — Supposons qu'en mettant l'aiguille en relation avec le pôle positif d'une pile Daniell, on ait sur l'échelle divisée une déviation de neuf divisions. Quelle sera la différence

Digitized by Google

du potentiel aux bornes d'une pile pour laquelle la déviation est de onze divisions? On aura :

$$\frac{V'}{V} = \frac{11}{9}.$$

La différence du potentiel aux bornes de cette pile vaudra donc $\frac{11}{9}$ fois la différence de potentiel aux bornes d'un élément Daniell.

Rappelons que la force électro-motrice d'une pile à circuit ouvert est représentée par le même nombre que la différence du potentiel aux bornes de cette pile.

Vérifier au moyen de l'électromètre à quadrants que la différence du potentiel aux bornes d'un élément est indépendante des dimensions de l'élément.

Mode opératoire

On monte deux éléments identiques de constitution, mais de dimensions différentes et on refait avec ces deux éléments l'expérience précédente. On trouve que $\alpha = \alpha'$.

On peut également vérifier les règles que nous avons précédemment indiquées pour le couplage des éléments et trouver que la différence de potentiel aux bornes d'une pile formée de plusieurs éléments en tension est égale à la somme des différences de potentiel aux bornes de chaque élément.

La figure 180 montre la disposition adoptée pour avoir une pile d'un grand nombre d'éléments ou pile de charge.

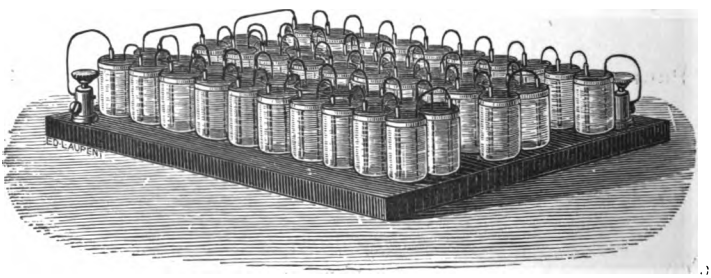


Fig. 180

Chaque élément peut être constitué par un petit vase de verre contenant de l'eau rendue légèrement conductrice par quelques gouttes d'une solution concentrée de sulfate de zinc et dans laquelle plongent une lame de cuivre et une lame de zinc.

Digitized by Google

MESURE D'UNE DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

AU MOYEN DE L'ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE DE M. LIPPMANN

Description. — L'électromètre de M. Lippmann se compose d'un tube vertical, ouvert aux deux extrémités et terminé à sa partie inférieure par une pointe capillaire. Le tube renferme du mercure, lequel est soutenu dans le tube par l'action capillaire. La pointe capillaire plonge dans une dissolution étendue d'acide sulfurique contenue dans une éprouvette cylindrique B, au fond de laquelle il y a du mercure.

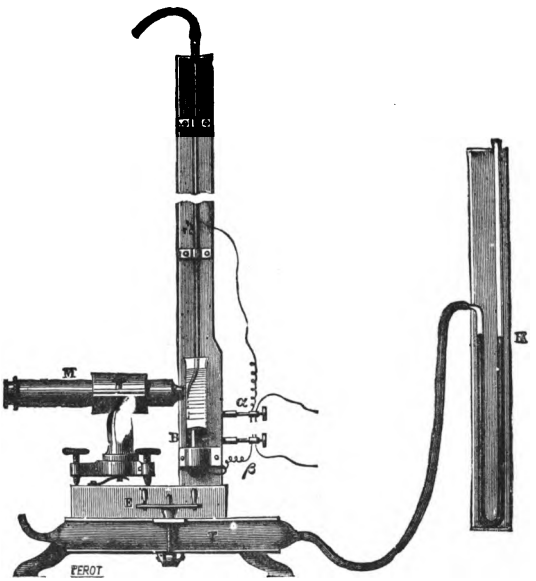


Fig. 181

Le mercure du tube vertical communique avec une borne α, celui de la cuvette inférieure avec une borne β. Le tube vertical communique avec un manomètre à air libre H (*fig. 181*).

Mode opératoire

Pour mesurer une différence de potentiel (cette différence étant toutefois inférieure à 0,9 volt), on met la borne α en rela-

Digitized by Google

tion avec le point de potentiel le moins élevé et la borne β avec le point de potentiel le plus élevé (1).

On constate aussitôt que le niveau du mercure se relève dans le tube. Ce relèvement s'observe au moyen d'un microscope M muni d'un micromètre oculaire. On ramène au zéro en exerçant à la surface du mercure du tube une pression que l'on mesure au moyen du manomètre à air libre. Avant chaque expérience, on détermine le zéro en mettant les bornes α β en relation (*en court circuit*).

Nota. — Il faut avoir soin de ne pas faire le contraire, car dans ce cas il pourrait se former dans le tube capillaire des cristaux de sulfate de mercure qui empêcheraient le mercure de circuler et mettraient ainsi l'appareil hors d'usage.

(1) Pour un générateur d'électricité, nous dirons qu'on met la borne α en relation avec le pôle négatif, la borne β avec le pôle positif.

Digitized by Google

GALVANOMÈTRES

Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de décrire les différents modèles de galvanomètres que l'on rencontre dans les laboratoires. Cependant nous ne croyons pas inutile d'en décrire trois modèles : le galvanomètre Deprez d'Arsonval, le galvanomètre Thomson, et enfin le galvanomètre Bourbouze, le premier de ces trois par rang de date. C'est par celui-ci que nous commencerons.

Galvanomètre Bourbouze. — Se compose essentiellement d'un fléau en acier aimanté B B′ dont l'horizontalité peut toujours

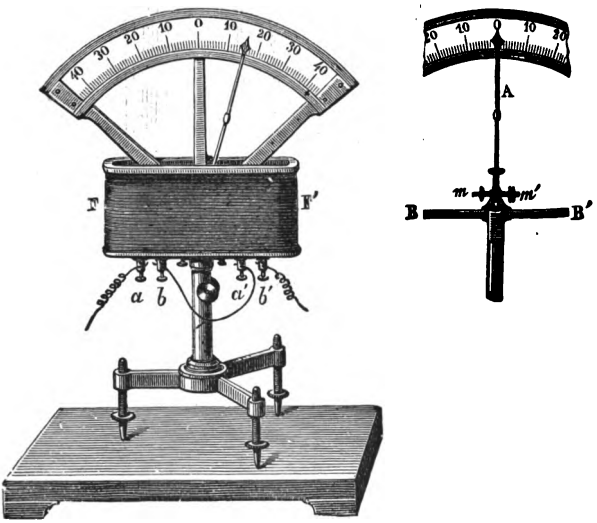


Fig. 182

être obtenue à l'aide de petits contrepoids *m m′* On fait varier à volonté la sensibilité du fléau en élevant ou abaisssant son centre de gravité avec les boutons à vis. Une longue aiguille A fixée perpendiculairement au fléau indique sur un cadran divisé les

Digitized by Google

moindres oscillations. Le fléau est placé à l'intérieur d'une large bobine plate F F'. La bobine étant à deux fils, il est facile de transformer l'instrument en galvanomètre différentiel.

Quand on veut faire une expérience, on place le galvanomètre de façon que le fléau soit sensiblement dans le plan du méridien magnétique. On rend la colonne verticale au moyen de vis calantes, puis on déplace les contrepoids, de façon que le fléau se maintienne horizontal. L'appareil ainsi réglé, lorsqu'on fait passer un courant, l'aiguille, mobile devant le cadran divisé, prend après quelques oscillations sa position d'équilibre. L'appareil de M. Bourbouze, qui a rendu de grands services dans les expériences de cours, est moins sensible que les galvanomètres que nous allons décrire maintenant. Cependant sa sensibilité est assez grande pour qu'on puisse l'employer encore avantageusement dans les méthodes de zéro.

Galvanomètre Deprez d'Arsonval. — La figure 183 représente

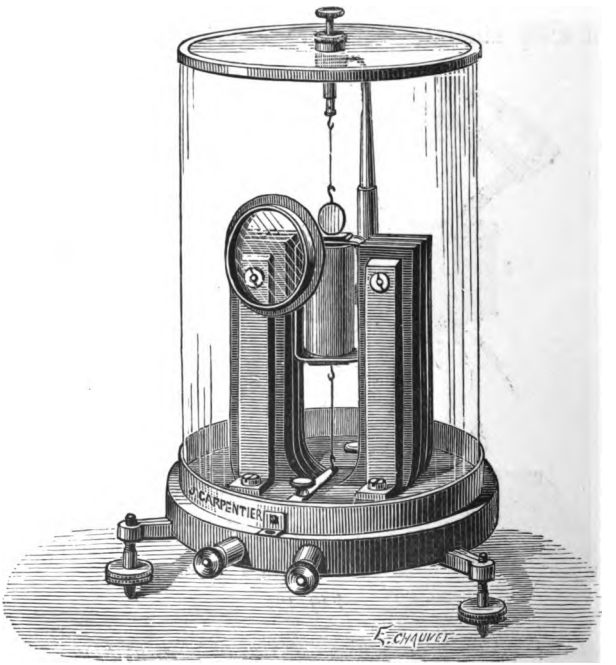


Fig. 183

le galvanomètre Deprez d'Arsonval. L'aimant, en fer à cheval,

Digitized by Google

est fixé dans le pied de l'appareil. Entre ses branches se déplace un cadre rectangulaire supporté par deux fils de platine qui servent aussi à amener le courant. Sur l'un de ces fils est fixée une aiguille mobile sur un cadran divisé, ou bien un petit miroir, lorsque l'on observe la déviation par la méthode optique.

La propriété importante de cet appareil est qu'il revient immédiatement et *sans oscillations* au zéro lorsqu'on le met en *court-circuit*, c'est-à-dire lorsqu'on réunit ses deux bornes par une résistance négligeable. On dit qu'il est *apériodique.*

Galvanomètre Thomson. — La figure *184* représente le mo-

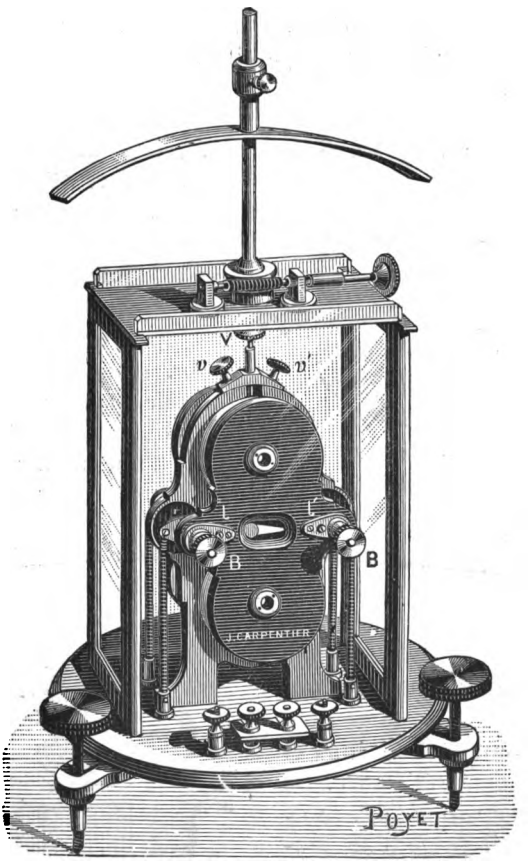


Fig. 184

dèle du galvanomètre Thomson construit par l'ingénieur Car-

Digitized by Google

pentier. Le système mobile est porté par un fil de cocon. Il comprend : 1° une palette légère en mica portant un petit miroir; 2° un système de deux petits aimants, l'un en haut, l'autre en bas, dont les pôles sont placés en sens contraires. Chacun de ces petits aimants se meut au centre d'une bobine parcourue par le courant. Les deux bobines sont elles-mêmes séparées chacune en deux moitiés par un plan vertical, ce qui permet de régler le système mobile à l'intérieur de l'appareil.

On peut également, suivant l'expérience à faire, disposer les bobines en *tension* ou en *quantité*, ou bien encore remplacer les bobines à fil fin par des bobines à gros fil.

Un aimant mobile, placé à la partie supérieure permet de rendre le système *astatique*. On augmente ou on diminue à volonté la sensibilité de l'appareil en éloignant ou rapprochant cet aimant.

Ampèremètre. — La figure 185 représente l'ampèremètre Carpentier. C'est un galvanomètre dont les indications donnent par une lecture directe l'intensité du courant en ampères. L'ampèremètre se met toujours en tension (*fig. 186*), c'est-à-dire s'intercale dans le circuit principal et ses indications se font d'une manière continue.

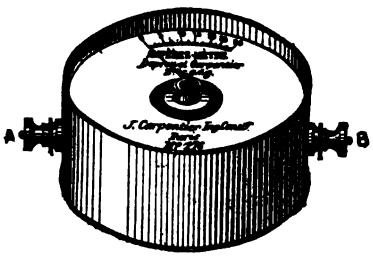


Fig. 185

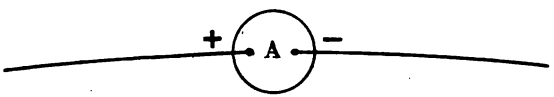


Fig. 186

Voltmètre (fig. 187).

Galvanomètre à fil long et fin, de grande résistance. *Se place en dérivation* (*fig. 188*).

L'appareil porte une graduation qui donne par simple lecture la différence de potentiel en *volts*.

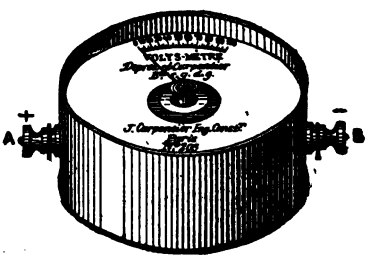


Fig. 187

Digitized by Google

On met généralement un interrupteur K que l'on ne ferme qu'au moment de faire la lecture au voltmètre.

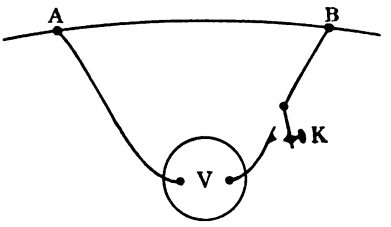


Fig. 188

Nous aurons à nous servir de ces deux appareils dans des manipulations où il nous faudra connaître l'intensité du courant et la différence de potentiel entre deux points du circuit.

Digitized by Google

LOIS D'OHM

Vérification des lois d'Ohm

La formule d'Ohm est la suivante :

$$e = I\,R.$$

Elle exprime que la différence du potentiel entre deux points d'un circuit est proportionnelle à l'intensité du courant qui circule entre ces deux points et aussi proportionnelle à la résistance intercalée.

Mode opératoire

Pour vérifier ces deux parties de la loi, on constituera un circuit formé d'une pile P de deux ou trois éléments, d'un rhéostat de réglage R et d'un fil homogène A B. Deux contacts glissants C O permettent de mettre deux points de ce fil en relation chacun avec une des paires de quadrants de l'électromètre.

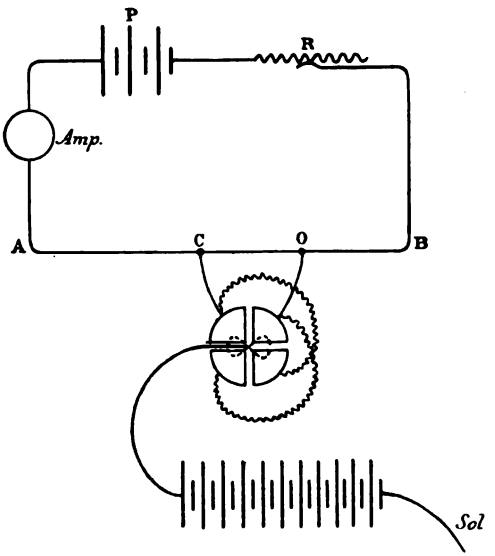


Fig. 189

En faisant varier la longueur O C, on constatera que la différence de potentiel est proportionnelle à cette longueur O C, et par suite à la résistance entre les points C O (ceci suppose le fil homogène).

En remplaçant le fil A B par un autre, de section différente, on constatera que pour une même longueur

Digitized by Google

C O, les différences de potentiel sont en raison inverse des sections des deux fils, et par suite proportionnelles aux résistances de ces deux fils.

Enfin, pour un même fil A B et pour une même longueur C O, on pourra, en faisant varier la résistance R, faire varier l'intensité du courant. Un ampèremètre donnera à chaque instant la valeur de cette intensité. On vérifiera que la différence de potentiel est bien proportionnelle à I.

Enfin si I est exprimé en ampères, R en ohms et e en volts. On a numériquement $e = I \times R$.

Application de la loi d'Ohm

Etablir entre deux points A et B une différence de potentiel e.

Mode opératoire

Supposons que ces deux points fassent partie d'un circuit dans lequel passe un courant dont l'intensité est I, intensité que nous supposons maintenue constante. Nous intercalerons entre ces deux points une résistance R calculée de façon que nous ayons numériquement :

$$I R = e.$$

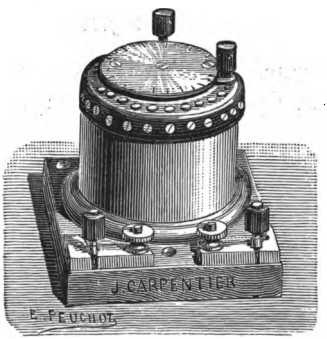


Fig. 190

Nous verrons plus loin une application de ceci, dans la mesure des forces électro-motrices des piles par la méthode du potentiomètre.

Rhéostats de réglage

On appelle rhéostats des appareils disposés de telle sorte qu'on peut, en faisant varier la résistance intercalée dans le circuit, faire varier par cela même l'intensité du courant.

Digitized by Google

La figure 190 représente le rhéostat à manette de l'ingénieur Carpentier, les figures 191 et 192 montrent deux autres

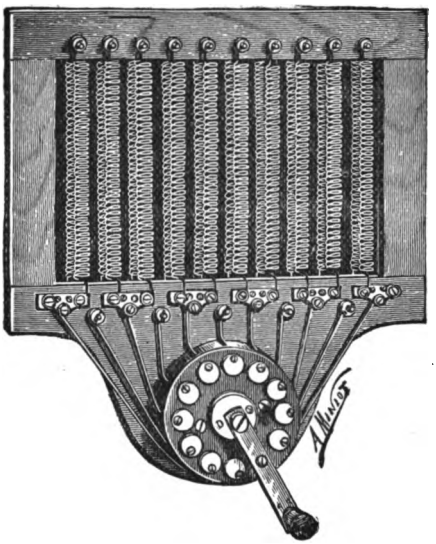


Fig.191

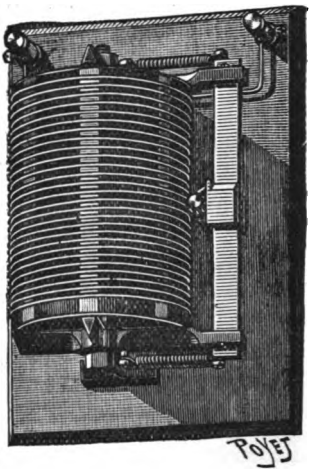


Fig. 192

formes usuelles de rhéostats de laboratoires. La figure seule suffit pour en faire comprendre le fonctionnement.

Digitized by Google

APPLICATION DES COURANTS DÉRIVÉS

Shuntage d'un galvanomètre

Pour éviter de faire passer dans un galvanomètre un courant trop intense, on met en dérivation, aux bornes de ce galvanomètre, une résistance S. Cette opération porte le nom de *shuntage* du galvanomètre.

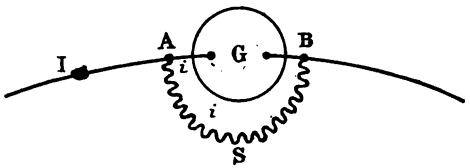


Fig. 193

On appelle *shunt* la résistance ainsi mise en dérivation :

Soit I l'intensité du courant principal.
i — — qui passe dans le galvanomètre.
i' — — — dans le shunt.
G la résistance du galvanomètre.
S — du shunt.

On a : $$I = i + i'$$

et $$Gi = Si',$$

d'où : $$i' = i \times \frac{G}{S}.$$

Si l'on veut ne faire passer dans le galvanomètre que la n^e partie du courant I, on a :

$$I = i + i' = i\left(1 + \frac{G}{S}\right) = \frac{I}{n}\left(1 + \frac{G}{S}\right),$$

d'où $$n = 1 + \frac{G}{S} \quad \text{ou} \quad \frac{G}{S} = n - 1,$$

ou enfin $$S = \frac{G}{n - 1}.$$

Digitized by Google

Si par exemple on veut que i soit la 100e partie de I, il faudra prendre comme shunt une résistance égale à la quatre-vingt-dix-neuvième partie de celle du galvanomètre.

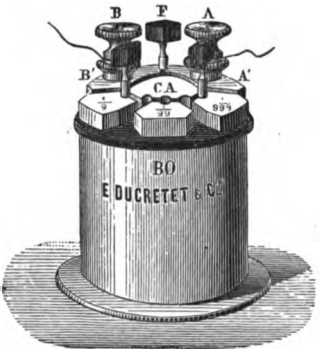


Fig. 194

A chaque galvanomètre est joint un shunt ou une boîte de shunts, permettant de faire passer dans le galvanomètre $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$ de I par l'intermédiaire de résistances respectivement égales à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ de celle du galvanomètre.

La figure 194 représente une boîte de shunts ainsi constituée,

Digitized by Google

LOIS DE FARADAY

Vérification des lois. — Mesure de l'intensité d'un courant par l'électrolyse

Enoncé des lois de Faraday

1° La quantité d'électrolyte décomposé par un courant est proportionnelle au temps de passage du courant (dans le cas d'un courant constant) ;

2° La quantité d'électrolyte décomposé pendant un temps donné est proportionnelle à l'intensité du courant ;

3° Le poids de métal déposé à l'électrode de sortie du courant (cathode), est proportionnel à son équivalent électro-chimique.

Mode opératoire

On monte en circuit : une pile P, ou mieux un accumulateur, un rhéostat R, un ampèremètre A et un voltamètre à sulfate de cuivre V.

Dans le modèle représenté par la figure 196, les deux lames extrêmes, réunies par une bande de cuivre, constituent le pôle d'entrée du courant (anode). La lame intermédiaire est la cathode. Elle a été préalablement pesée.

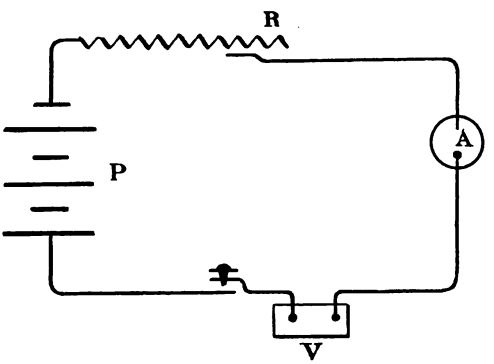


Fig. 195

Il faut avoir soin de ne point employer un courant trop intense ni trop faible. On sera assuré d'être dans de bonnes conditions lorsque le

Digitized by Google

dépôt de cuivre résultant de l'électrolyse se fera régulièrement et uniformément sur la lame, sans former de paillettes cristallines sur les arêtes et sur les coins de cette lame.

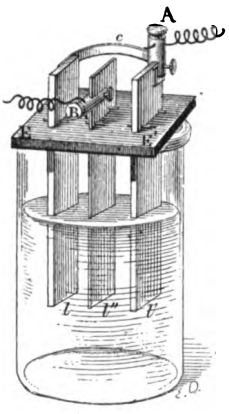


Fig. 196

C'est à ce réglage, important pour pouvoir effectuer une bonne mesure, que servira le rhéostat R. On fait passer le courant pendant un certain temps, en surveillant les indications de l'ampèremètre. On fera au besoin varier la résistance, de façon que l'indication de cet appareil demeure constante. On pèse à nouveau la lame de cuivre, préalablement essuyée et séchée *sans frottements*. La différence avec le poids primitif donne le poids du cuivre déposé pendant le temps *t*.

On fait passer le courant pendant un temps 2 *t* et l'on vérifie que le poids de cuivre déposé est double, en supposant bien entendu que l'intensité du courant n'ait pas varié.

2e *Loi*. — On refait les mêmes opérations en faisant varier l'intensité au moyen du rhéostat et faisant passer le courant pendant le même temps pour chaque détermination.

On réunit ainsi ces deux lois sous la formule :

$$P = K\,I\,T,$$

I étant exprimé en ampères.
T — en secondes.

On tire de là :

$$K = \frac{P}{I\ T}.$$

On calcule K par cette méthode. On doit trouver pour le cuivre :

$$K = 0^{g},00033.$$

Exemple numérique. — Si on fait passer pendant 50 minutes un courant de 0,4 ampères, on devra trouver pour P :

$$P = 0^{g},00033 \times 0,4 \times 50 \times 60 = 0^{g},396.$$

Digitized by Google

On peut encore opérer sous une autre forme qui n'implique pas l'emploi d'un ampèremètre. A la suite de la première cuve à sulfate de cuivre, on bifurque le courant en deux branches M V_1 N M V_2 N sur chacune desquelles on place un voltamètre identique au premier (*fig. 197*). En faisant passer le courant pendant un certain temps, on constatera, par les pesées, que la somme des poids V_1 et V_2 est égale au poids déposé en V.

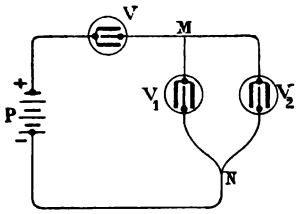


Fig. 197

$$P = P' + P''.$$

Par application des lois des courants dérivés, on a, en appelant I l'intensité du courant principal I' et I'' les intensités des courants dérivés

$$I = I' + I''.$$

Un raisonnement simple montrera qu'on peut en déduire

$$\frac{P}{I} = \frac{P'}{I'} = \frac{P''}{I''}.$$

3e Loi. — Monter en tension un voltamètre à sulfate de cuivre V et un voltamètre à eau acidulé V' (*fig. 198*). Faire passer le courant. On vérifiera que les poids de cuivre et d'hydrogène déposés aux pôles de sortie du courant sont dans le rapport des nombres inscrits dans le tableau ci-après.

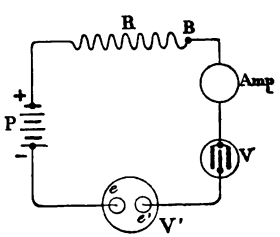


Fig. 198

Remarque. — En réalité, on ne pèse pas l'hydrogène. On détermine son poids en mesurant le volume qu'il occupe, volume mesuré à la pression extérieure H. On en déduit le poids par la formule :

$$P = V \times 1{,}293 \times 0{,}0695 \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t},$$

Digitized by Google

H étant la pression atmosphérique et t la température au moment de l'expérience.

NOMS DES CORPS	ÉQUIVALENTS électrochimiques	POIDS DÉGAGÉ par 1 ampère-heure
	milligrammes par coulomb	grammes
Hydrogène	0,01036	0,0375
Aluminium	0,1425	0,5137
Argent	1,1232	4,05
Baryum	0,7124	2,568
Cadmium	0,5824	2,095
Calcium	0,208	0,75
Chrome	0,2725	0,9825
Cobalt	0,3068	1,1062
Cuivre	0,3307	1,1925
Etain	0,6136	2,2525
Fer	0,2912	1,05
Magnésium	0,1269	0,4575
Mercure	1,036	3,75
Nickel	0,3068	1,1062
Or	1,0223	3,6862
Palladium	0,5533	1,9947
Platine	1,0254	3,6975
Plomb	1,0764	3,8812
Zinc	0,3401	1,2262

La vérification des lois de Faraday étant faite, on se servira de la formule $P = K\,I\,T$ pour mesurer l'intensité du courant.

On peut comparer les résultats ainsi trouvés expérimentalement avec les indications données par l'ampèremètre ou par un électro-dynamètre. Cette méthode peut même servir à étalonner un ampèremètre en notant les différentes valeurs de I correspondant aux divisions de l'ampèremètre.

Remarque. — Le volume d'hydrogène, mis en liberté par un courant de 1 ampère pendant une seconde (un coulomb), mesuré à

Digitized by Google

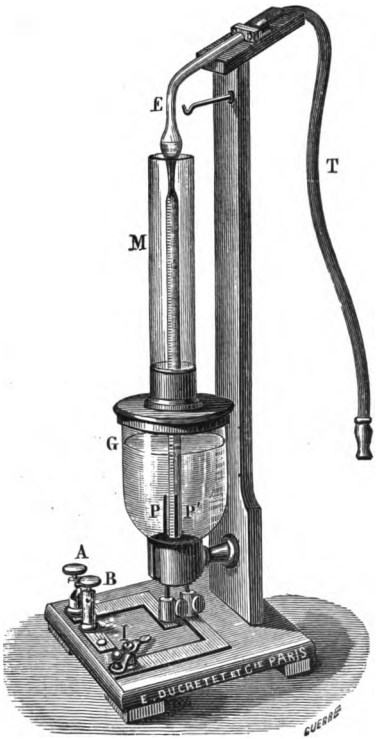


Fig. 199

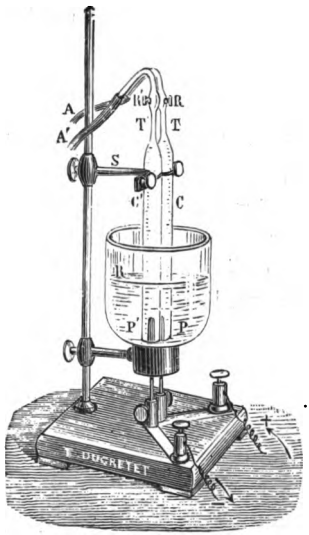


Fig. 200

0° et 76 centimètres de pression, occupe un volume de 0,1155 centimètres cubes.

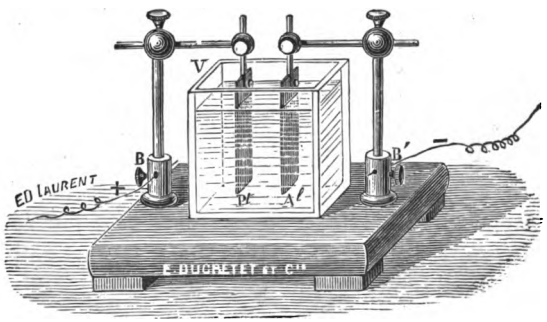


Fig. 201

Les figures 199, 200 et 201 montrent les dispositions données aux voltamètres à sulfate de cuivre et à hydrogène.

Digitized by Google

GALVANOPLASTIE

La galvanoplastie peut s'appliquer de deux façons différentes :

1° Dépôt de couches métalliques non adhérentes sur des moules à reproduire.

2° Dépôt de couches métalliques adhérentes à la surface du corps à métalliser. Cette seconde application comprend la dorure, l'argenture, le nickelage, le cuivrage, le platinage.

Reproductions galvaniques

Pour reproduire un objet par la galvanoplastie, une médaille par exemple, il faut d'abord mouler cette médaille. Le moule obtenu sera ensuite employé comme cathode, pôle de sortie du courant, dans l'électrolyse d'un sel du métal qui doit constituer la reproduction.

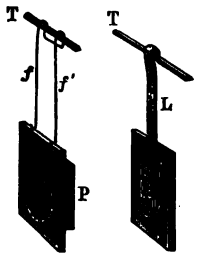


Fig. 202

Fabrication du moule. — Les moules peuvent se faire soit en métal, soit en plâtre, en stéarine, en gutta-percha. L'obtention du moule en métal se fait par la galvanoplastie même, en prenant comme cathode l'objet à reproduire, enduit préalablement d'essence de térébenthine pour empêcher l'adhérence entre le métal du modèle et le métal déposé par l'électrolyse.

Parmi les autres procédés de moulage, le plus employé et le plus facile à pratiquer est le moulage à la gutta-percha.

Mode opératoire

On prend de la gutta-percha que l'on ramollit légèrement en la trempant dans de l'eau bouillante jusqu'à lui donner une

Digitized by Google

élasticité suffisante. On l'applique ensuite sur le modèle à modeler, après avoir enduit celui-ci d'huile, ou simplement d'eau de savon. On presse avec la main de façon à faire prendre à la gutta tous les creux et reliefs du modèle. On l'enlève ensuite et on laisse sécher.

Lorsqu'elle est dure, on enduit le moule de plombagine ou même on le trempe dans une dissolution d'azotate d'argent, puis on l'expose à un dégagement d'hydrogène sulfuré. Le sulfure d'argent déposé rend conductrice la surface du moule.

La seconde opération est la formation du dépôt métallique sur le moule.

Les cuves électrolytiques employées en galvanoplastie sont de deux modèles :

Le modèle simple, dans lequel on utilise le courant intérieur de la pile constituant elle-même la cuve électrolytique.

Le modèle composé dans lequel le générateur du courant est

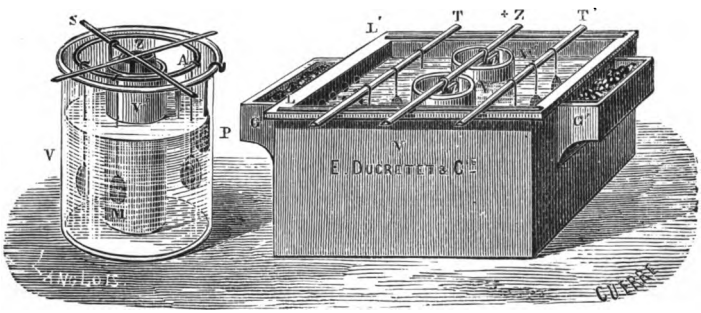


Fig. 203

séparé de la cuve à décomposition. C'est aujourd'hui le plus employé.

Le bain simple (*fig. 203*) se compose d'un élément Daniell dans lequel le pôle de cuivre est remplacé par l'objet à recouvrir.

Dans l'appareil composé (*fig. 204*), la cuve électrolytique a des dimensions très variables suivant les dimensions des objets. Elle porte deux tiges en laiton. A l'une d'elles, que l'on relie au pôle négatif du générateur (pile ou machine), on attache les moules ou objets à recouvrir, l'autre porte l'anode soluble.

Lorsque l'on juge le dépôt suffisant, on enlève la gutta à l'eau chaude et on lave avec une brosse la surface du métal.

Digitized by Google

Le courant employé ne doit pas être très intense, sous peine de donner des dépôts irréguliers et non homogènes.

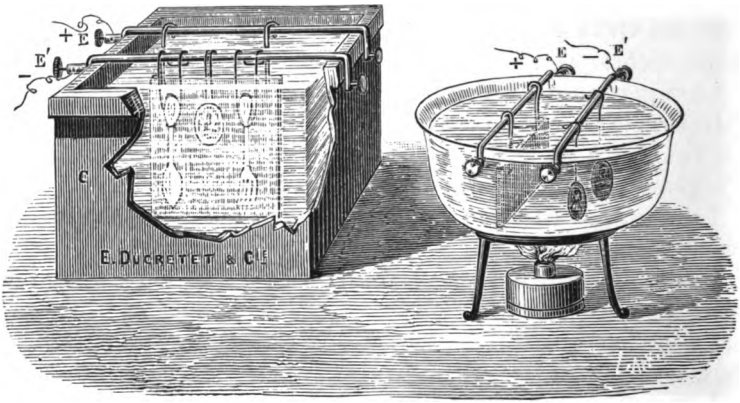


Fig. 204

Pour le cuivrage, on emploie du sulfate de cuivre comme dissolution et une lame de cuivre comme anode soluble.

Cuivrage des objets de fer ou de fonte

Procédé Oudry

On enduit d'abord la pièce d'un enduit résineux contenant du minium, puis on recouvre de plombagine. On met ensuite dans la cuve à électrolyse et on laisse le dépôt arriver à une épaisseur de 1 millimètre. On peut remplacer l'enduit résineux en plongeant l'objet dans une peinture épaisse, formée d'huile chaude et de poudre de cuivre en suspension dans le liquide.

Argenture — Dorure — Nickelage, etc.

1re Opération. — Décapage des objets

Bronze et laiton. — On commence par chauffer les objets pour leur enlever les matières organiques qui peuvent exister à leur surface. On les plonge ensuite pendant quelques instants dans un bain à 20 % d'acide sulfurique, puis dans un bain

Digitized by Google

faible d'acide azotique ordinaire, puis on les lave à grande eau et on les replonge dans un bain concentré d'acides nitrique, chlorhydrique et sulfurique. On les fait ensuite sécher à 40°.

Argent et maillechort. — On dégraisse à la potasse, puis on frotte avec une brosse de crin et une bouillie de pierre ponce pulvérisée.

Les autres métaux sont tout d'abord passés à la potasse, puis, suivant les cas, plongés dans de l'acide chlorhydrique seulement ou dans le bain à acides mélangés, ou simplement frottés à la pierre ponce. Après le décapage, les pièces sont mises au bain.

2e *Opération*

Bain d'argenture. — Le bain employé est une dissolution de cyanure double d'argent et de potassium contenant 10 ou 20 grammes d'argent par litre. Anode d'argent pur.

Bain de dorure. — On prend une dissolution contenant par litre 5 grammes de cyanure de potassium et 1 gramme de chlorure d'or non acide. On opère généralement à 70°. L'anode est une lame d'or fin.

Bain de nickelure. — On emploie une dissolution à 8° Baumé de sulfate double de nickel et d'ammoniaque.

L'anode est une lame de nickel.

Nous renverrons le lecteur aux ouvrages spéciaux pour la composition des autres bains et pour les opérations du brunissage et du polissage.

Digitized by Google

BOITES DE RÉSISTANCE

Les boîtes de résistance, étalonnées à $\frac{1}{1000}$ près, contiennent des bobines qui représentent des multiples de l'ohm.

La figure 205 montre comment ces bobines peuvent être intercalées dans le circuit par l'enlèvement des fiches F, ou au contraire mises en court circuit lorsqu'on replace ces fiches entre les blocs de laiton auxquels sont soudées les extrémités des bobines.

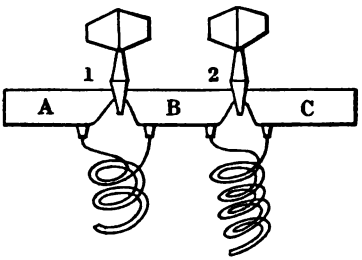


Fig. 205

Devant chaque trou est inscrit sur le couvercle de la boîte la valeur en ohms de la résistance correspondante.

Généralement les boîtes de résistance présentent des bobines rangées comme les poids d'une boîte de poids.

C'est-à-dire	1	bobine de	1 ohm.
	2	—	2 —
	1	—	5 —
	1	—	10 —
	2	—	20 —
	1	—	50 —
	1	—	100 —
	2	—	200 —
	1	—	500 —

et ainsi de suite.

On trouve aussi des boîtes dont la résistance est, si la bobine de plus grande résistance est de 500 ohms, de 1110 ohms.

Si la plus grande résistance est de 5000 ohms, la résistance totale est de 11110 ohms, etc.

Digitized by Google

Mode opératoire

Pour introduire, par exemple, la résistance 427 ohms, on débouchera les résistances 200, 200, 20, 5 et 2.

La figure 206 représente une autre disposition plus commode donnée aux boîtes de résistance.

Cette disposition, connue sous le nom de boîte à *décades*, a l'avantage de nécessiter un petit nombre de clefs, puis de rendre plus facile la lecture de la résistance introduite.

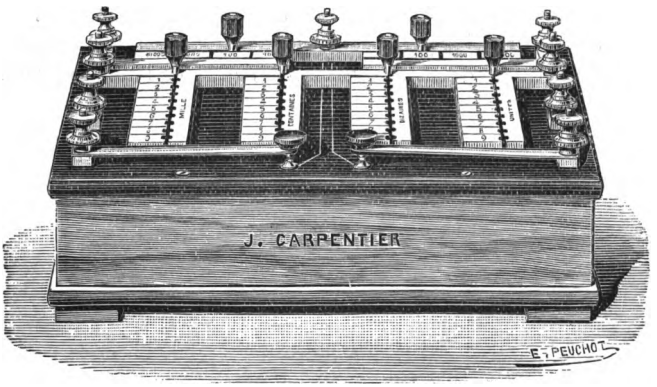


Fig. 206

Ici toutes les résistances sont groupées par 9, identiques entre elles :

9 de 1 ohm.
9 de 10 —
9 de 100 —
9 de 1000 — etc.

Mode opératoire

Pour introduire la résistance 427, nous mettrons une fiche au trou marqué zéro dans la rangée des mille, une fiche au trou 4, dans la rangée des centaines, une autre au trou 2, dans la rangée des dizaines, une au trou 7, dans la rangée des unités.

Digitized by Google

Précautions à prendre dans l'emploi des boîtes de résistance

Il faut avoir soin que les clefs soient en parfait état de propreté. La moindre tache peut produire un mauvais contact et fausser beaucoup les indications. On peut nettoyer les clefs avec du papier émeri très fin en évitant qu'aucun grain métallique ne reste attaché à la clef.

Avant de faire une mesure, il faut s'assurer du bon contact des clefs avec les blocs de laiton. On y arrive en donnant à chaque fiche une légère pression en même temps qu'on lui imprime un quart de tour dans l'intervalle qui la contient.

Digitized by Google

MESURE DES RÉSISTANCES

Méthode par comparaison

Monter en circuit : la résistance à mesurer R', une pile et un galvanomètre. Pour éviter de laisser passer dans le galvanomètre un courant trop intense, on intercalera un rhéostat de réglage R (*fig. 207*).

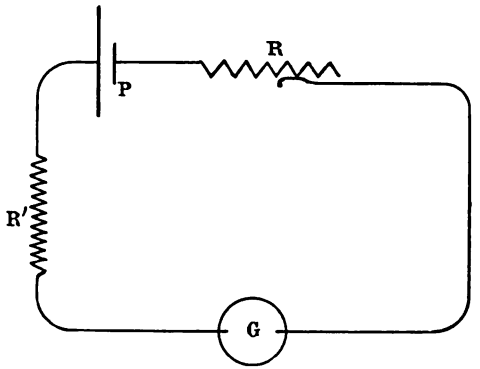


Fig. 207

On note la déviation de l'aiguille du galvanomètre, soit par lecture directe, soit au moyen d'une échelle divisée (voir *Méthode objective et Méthode subjective*). Si on a un galvanomètre à miroir.

Remplacer la résistance R par une boîte étalonnée et faire varier la résistance de façon à avoir la même déviation. On a alors, à une unité près, la résistance cherchée.

Méthode du pont de Wheatstone

La figure 208 représente le schéma de la méthode.

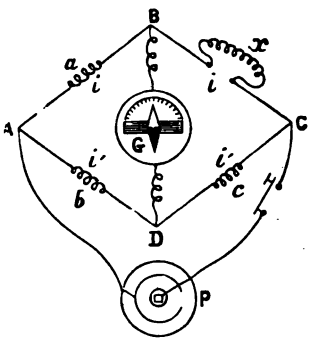


Fig. 208

P est une pile ou un accumulateur.

G un galvanomètre qui, ici, jouera le rôle de galvanoscope, la méthode étant une méthode de zéro.

a b c sont des boites de résistance.

x est la résistance à mesurer.

On peut se servir, pour cette mesure, des boîtes de résistance dites boîtes à pont (*fig. 209*) dans lesquelles les résistances *a b c* sont réunies sur la même boîte.

Digitized by Google

Il est préférable, pour bien se rendre compte de la méthode, de se servir de boites séparées.

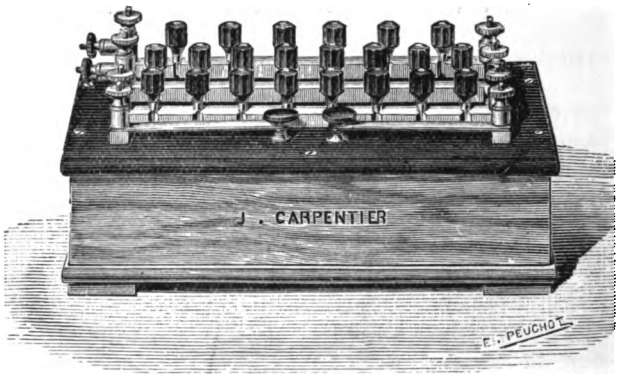


Fig. 209

Théorie. — Lorsque les résistances *a b c x* sont réglées de telle sorte que le galvanomètre reste au zéro, on a entre *a b c x* la relation :

$$\frac{a}{b} = \frac{x}{c}, \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{a}{b}\,c.$$

a et *b* portent le nom de bras de pont. Ces bras sont en général constitués par de petites boîtes de résistances comprenant

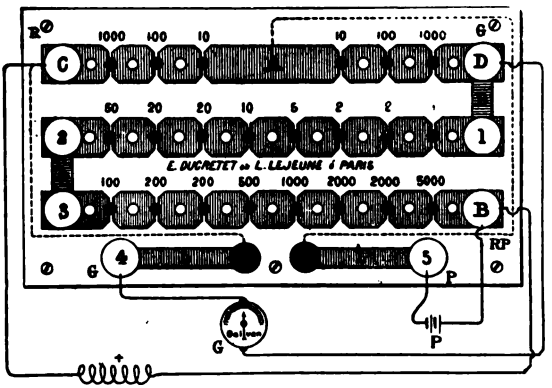


Fig. 210

des bobines de 1, 10, 100, 1000 ohms; au contraire, la boîte *c*, comprend les résistances de 1 à 5000 ohms (en général), et

Digitized by Google

pouvant par suite former toutes les résistances de 1 à 11110 ohms.

Dans l'emploi de cette méthode par les boîtes, on donne au rapport $\frac{a}{b}$ une valeur déterminée et on fait varier c.

Mode opératoire

On donne d'abord au rapport $\frac{a}{b}$ la valeur 1, en mettant les fiches de ces deux bras de pont sur la même bobine. On introduit en c une résistance certainement trop grande par exemple de 500 ohms; on ferme la clef de la pile, puis la clef du galvanomètre et on note le sens de la déviation ainsi que la grandeur (1). On recommence en introduisant une résistance moindre, en continuant ainsi jusqu'à ce que la déviation change de sens. Supposons, pour fixer les idées, que la déviation se fasse à droite pour une résistance de 26 ohms en c, et à gauche pour 27. Cela veut dire que la résistance à mesurer est comprise entre 26 et 27 ohms.

On refait les mêmes opérations en prenant a et b de façon que $\frac{a}{b} = \frac{1}{10}$. Alors x sera compris entre 260 et 270. On pourra donc déterminer deux entiers consécutifs, par exemple 264 et 265, entre lesquels la déviation change de sens.

On peut continuer de même en prenant $\frac{a}{b} = \frac{1}{100}$.

On déterminera ainsi un chiffre de plus. On trouvera, par exemple, que x est compris entre $\frac{1}{100} \times 2643$ et $\frac{1}{100} \times 2644$. De sorte que x est compris entre 26,43 ohms et 26,44 On a ainsi déterminé la résistance à $\frac{1}{100}$ près.

Remarque. — Il faut avoir soin de fermer *d'abord* la clef de la pile, puis ensuite celle du galvanomètre. On s'assurera, avant d'effectuer une mesure, que les fiches sont bien adhérentes aux

(1) Dans la figure 208, la clef du galvanomètre n'est pas représentée, mais il faut avoir soin d'en mettre une dans l'application de cette méthode.

Digitized by Google

blocs dans lesquels elles pénètrent. Un mauvais contact de l'une des fiches peut entraîner de grandes erreurs.

La figure 209 représente le pont à boites réunies.

La figure 210 montre comment sont faites les liaisons.

Les bobines A C et A D représentent les bras du pont a et b.

La résistance c est représentée par les bobines depuis D jusqu'à B.

La résistance x à mesurer s'attache aux points C et B.

La pile s'attache en B et au point 5, qui communique avec le bloc A.

Le galvanomètre s'attache en D et au point 4, qui communique avec le bloc C.

Les ressorts L et L′ remplacent les interrupteurs K et K′.

On doit d'abord abaisser L′, puis L.

Remarque. — Pour faire $a = b$, on peut faire a et b égaux tous deux à 1, 10, 100, 1000 ohms. L'expérience montre que la disposition la plus avantageuse est de faire $a = b = 1000$.

Emploi du pont à fil

La figure 211 représente le pont à fil divisé.

Un fil ff' est tendu le long d'une règle graduée en millimètres.

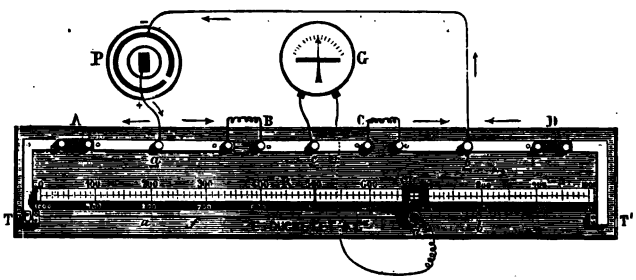


Fig. 211

Les bras du pont sont ici représentés par les deux portions a et b du fil, séparées par le contact glissant C U.

Ici, la résistance c est fixe et on fait varier le rapport $\frac{a}{b}$ en déplaçant le curseur C U.

Digitized by Google

Mode opératoire

La figure indique la façon dont sont faites les liaisons; B est la résistance à mesurer, C est la résistance fixe.

En déplaçant le curseur, on arrive à une position pour laquelle l'aiguille du galvanomètre reste immobile, qu'on appuie ou non sur la tête du curseur. On a alors :

$$x = \frac{a}{b} c.$$

Mesure de la résistance intérieure d'un élément par la méthode de Mance

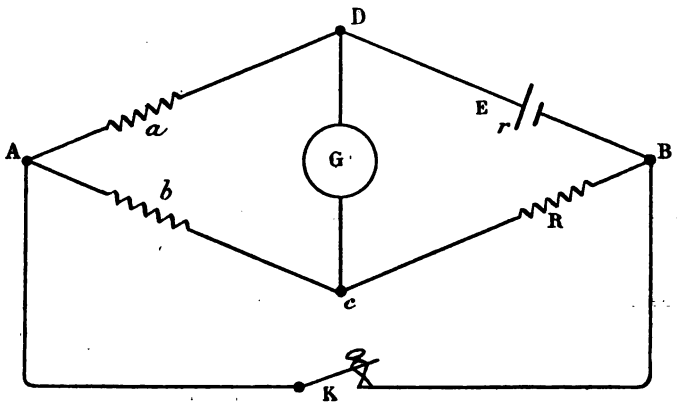


Fig. 212

On monte un pont, en plaçant la pile dans une des branches du pont, comme l'indique la figure 212.

On règle les résistances *a b* R pour que le galvanomètre reste au zéro lorsque l'on ferme la clef d'interruption K. On a alors :

$$r = \mathrm{R} \frac{a}{b}.$$

Digitized by Google

Mesure de la résistance d'un galvanomètre

Méthode de lord Kelvin

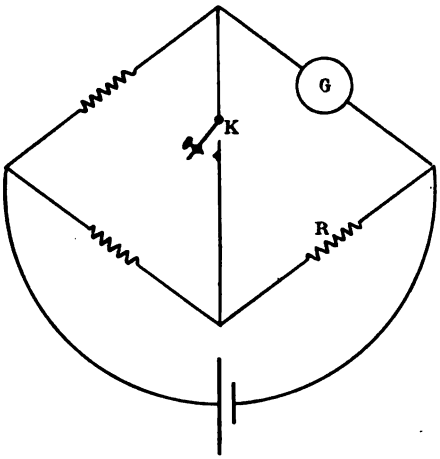


Fig. 213

On monte le galvanomètre sur la branche inconnue du pont et on règle *a b* R de façon que la déviation de l'aiguille ne change pas quand on ferme la clef K. On a alors, en désignant par G la résistance du galvanomètre :

$$G = R\,\frac{a}{b}.$$

Résistance de quelques fils métalliques par mètre de longueur (en ohms légaux)

	$1^{m}/_{m}$ de diamètre
Argent recuit	0,0190
Cuivre recuit	0,0202
Or recuit	0,0260
Aluminium recuit	0,0367
Platine	0,1143
Fer	0,1227
Nickel	0,1573
Mercure	1,2012
Maillechort	0,2643
Platine iridié (10 %)	0,02754

Digitized by Google

On voit, figure 214, l'ensemble de la disposition adoptée pour la mesure des résistances en se servant d'un galvanomètre Depry-d'Arsonval à miroir et d'une échelle Carpentier.

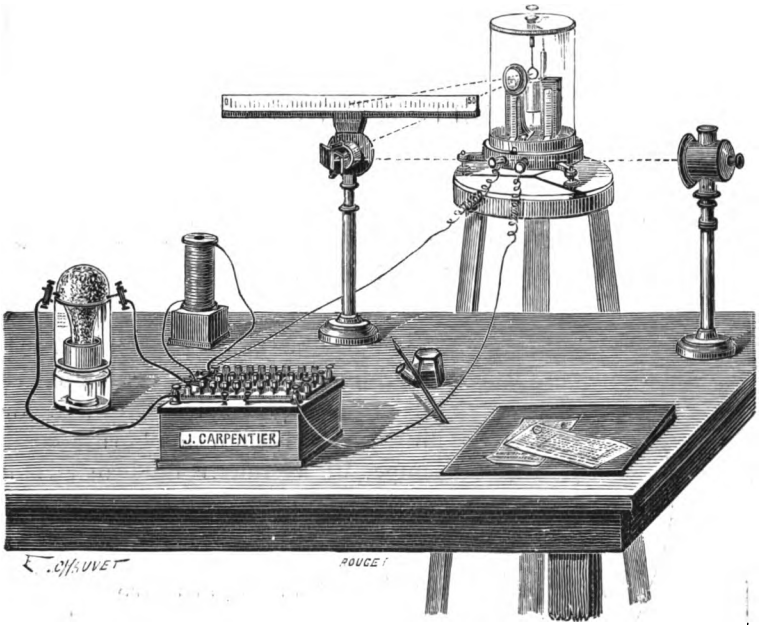


Fig. 214

Digitized by Google

EFFET JOULE

Mesure de la quantité de chaleur dégagée par le passage des courants

On peut prendre comme exemple une lampe à incandescence. On monte en circuit la lampe plongée dans un calorimètre, la pile et un ampèremètre. On monte de plus, en dérivation aux bornes de la lampe, un voltmètre relié au circuit par l'interrupteur K' (*fig. 215*).

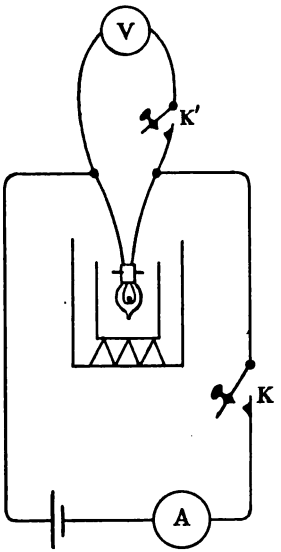


Fig. 215

Mode opératoire

On a préalablement pesé l'eau du calorimètre dont on a déterminé aussi la *valeur en eau*. Soit M la valeur en eau du calorimètre et de son contenu. Soit t la température initiale.

En fermant la clef K, on fait passer le courant dans la lampe pendant un temps déterminé θ.

On note la température finale T.

La chaleur gagnée par le calorimètre est :

$$Q = M(T - t).$$

L'application de la loi de Joule donne pour Q la valeur :

$$Q = \frac{I^2 r \theta \times 1000}{9{,}81 \times E},$$

Digitized by Google

E étant l'équivalent mécanique de la chaleur.
I — l'intensité du courant exprimée en *ampères*.
r — la résistance du circuit exprimée en *volts*.
θ — le temps du passage du courant exprimé en secondes.
Donc :

$$M(T - t) = \frac{I^2 r \theta \times 1000}{9{,}81 \times E}.$$

On tire de là :

$$E = \frac{I^2 r \theta \times 1000}{9{,}81 \times M(T - t)}.$$

Ce qui constitue ainsi une méthode de mesure de E.

Au lieu de calculer le produit $I^2 r$, on calcule la valeur égale $I e$ (loi d'ohm). I est donné par l'ampèremètre, e par le voltmètre.

Exemple. — Supposons un courant de 1,5 ampères et de 25 volts passant pendant 600 secondes (10 minutes). On aura :

$$E = \frac{1{,}5 \times 25 \times 600000}{9{,}81 \times M(T - t)}.$$

Digitized by Google

MESURE DES FORCES ÉLECTRO-MOTRICES DES PILES

Nous avons déjà vu comment on mesurait la force électromotrice des piles par l'électromètre, cette force électro-motrice étant dans ce cas *numériquement* égal à la différence de potentiel aux bornes de la pile, C'est là une méthode *électro-statique*.

Nous indiquons maintenant les méthodes *électro-dynamiques*.

Nous ne passerons pas en revue les différentes méthodes qui ont été employées et nous nous bornerons à en citer deux qui sont d'un usage courant dans les laboratoires :

1° La méthode *de compensation*, ou méthode de Poggendorff, sous la forme que lui a donnée M. Du Bois Reymond;

2° La méthode *d'opposition* par le potentiomètre sous la forme que lui a donnée M. Bouty.

Méthode de M. Du Bois Raymond

Dispositif de la méthode. — On constitue un circuit formé d'un fil homogène A B, de longueur *l*, d'une pile auxiliaire E et d'un rhéostat auxiliaire R.

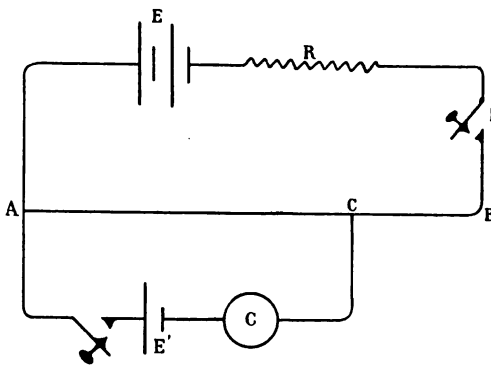


Fig. 216

En vertu des lois d'Ohm, on a, en appelant E la force électro-motrice de la pile E, R la résistance en R.

ρ la résistance du fil A B.

ϖ — de la pile E.

$$E = I(R + \rho + \varpi).$$

Digitized by Google

On attache en A un des pôles de la pile à mesurer E′ de façon que les pôles de même nom de E et E′ se correspondent.

L'autre pôle de la pile est relié à un contact mobile C qui glisse sur le fil A B. Un galvanomètre G est installé entre la pile E′ et le curseur C.

Des clefs d'interruption K et K′ permettent de fermer l'un et l'autre des deux circuits. On aura soin de fermer d'abord la clef K.

Mode opératoire

Dans une première expérience, on règle la position du curseur C de façon que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro. On a alors, en appelant E′ la force électro-motrice de la pile E′ et x la résistance de longueur A C.

$$\frac{E}{E'} = \frac{R + \rho + \varpi}{x}.$$

On recommence l'expérience, en donnant une autre valeur R′ à la résistance R. Il faut alors placer le curseur D dans une seconde position, telle que la résistance A C′ $= x'$. Au moment de l'équilibre, on aura comme précédemment :

$$\frac{E}{E'} = \frac{R' + \rho + \varpi}{x'},$$

d'où :

$$\frac{E}{E'} = \frac{R + \rho + \varpi}{x} = \frac{R' + \rho + \varpi}{x'} = \frac{R - R'}{x - x'}.$$

D'après une propriété bien connue des proportions.

R — R′ est connu. C'est la variation de résistance du rhéostat auxiliaire ; $x - x'$ est la variation de résistance résultant du déplacement du curseur sur le fil, variation qui est proportionnelle à ce déplacement, si le fil est bien homogène (on a déterminé préalablement la résistance totale du fil).

Digitized by Google

Méthode de M. Bouty

Dispositif

On se sert de deux boîtes de résistance *également divisées et composées des mêmes bobines.* On réunit par une bande de

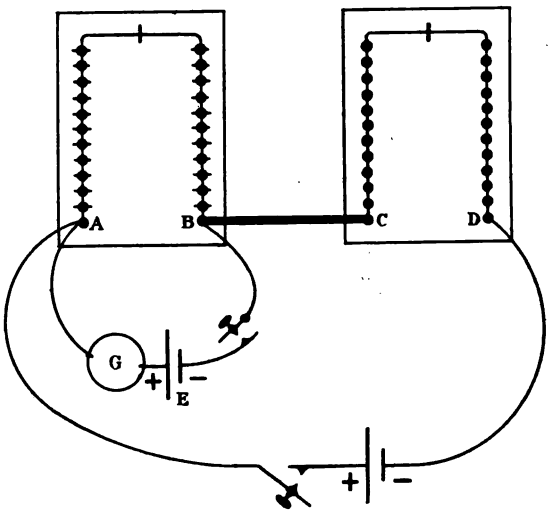


Fig. 217

cuivre les bornes B et C de ces deux boîtes (*fig. 217*).

On attache en A et D les pôles d'une pile auxiliaire P.

En A et B on attache ceux de la pile à mesurer E, de façon que le pôle attaché en A soit de même nom que le pôle de la pile P. Un galvanomètre G est installé dans le circuit de la pile E. Des clefs K et K′ permettent d'ouvrir ou de fermer les deux circuits. Comme précédemment, on aura soin de fermer d'abord la clef K, du circuit A E B.

Mode opératoire

On commence par enlever toutes les fiches de la boite C D. On introduit ainsi dans le circuit de la pile P une résistance R,

Digitized by Google

de sorte qu'en négligeant la résistance intérieure de la pile P de force électro-motrice e, on a :

$$e = I R.$$

On fait varier la résistance comprise entre les points A et B de façon que la différence de potentiel entre ces deux points fasse équilibre à la force électro-motrice E. Pour faire varier cette résistance, il suffit de déboucher progressivement les fiches de la boîte A B, mais pour que la résistance R ne varie pas, chaque fois que l'on débouchera une résistance en A B, on la supprime en C D en plaçant la fiche dans le plot correspondant. Quand le galvanomètre restera au zéro, si l'on a débouché des résistances dont la somme est R′, on a :

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{R'}.$$

Pour faire une observation, on ferme d'abord la clef K, puis la clef K′. On observe la déviation du galvanomètre. On ouvre les clefs, d'abord K′, puis K. On introduit en A B une résistance, par exemple la résistance marquée 200; on place la fiche rendue libre dans le trou marqué 200 de la boîte C D. On ferme les clefs et on observe le galvanomètre. Si la déviation est moindre que tout à l'heure, mais de même sens, c'est que 200 est trop faible; si elle est de sens contraire, 200 est trop fort. On recommence, en essayant dans le premier cas la résistance 300, dans le second 100, et ainsi de suite, en variant ensuite de 10 en 10, puis par unités.

Si l'on veut exprimer la force électro-motrice de la pile en fonction d'un étalon quelconque, on la remplace par cet étalon, et l'on recommence la même série d'opérations, soit R″ la résistance correspondant à cette seconde détermination. On a, en appelant E′ la force électro-motrice de l'étalon :

$$\frac{e}{E'} = \frac{R}{R''},$$

d'où :

$$\frac{E}{E'} = \frac{R'}{R''},$$

et enfin :

$$E = E' \frac{R'}{R''}.$$

Digitized by Google

Mesure de la capacité d'un condensateur par comparaison avec un condensateur étalonné (microfarad)

Principe de la méthode. — On charge le condensateur à étudier au moyen d'une pile de charge, constituée par un grand nombre de petits éléments montés en série et soigneusement isolés dans la paraffine. On décharge ensuite dans un galvanomètre balistique. On note l'élongation α de l'aiguille du galvanomètre. On fait la même expérience avec le condensateur étalonné. On note de même l'élongation α'. En appelant c et c' les deux capacités, on a la relation :

$$\frac{c}{c'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Mode opératoire

La figure 218 montre comment il faut disposer les deux appareils :

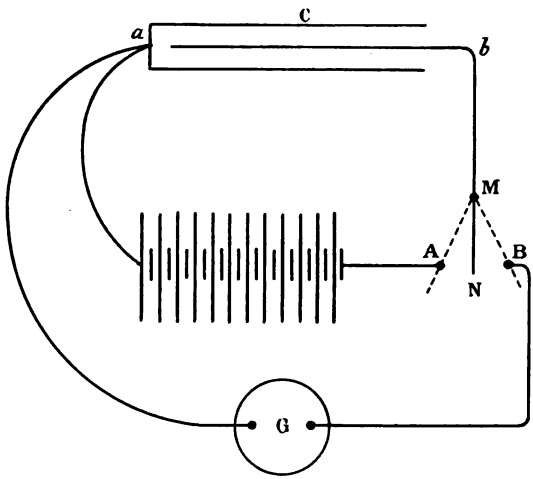


Fig. 218

P est la pile de charge.

C le condensateur dont les bornes *a* et *b* sont en commu-

Digitized by Google

nication, l'une avec une armature, l'autre avec l'autre armature.

G est le galvanomètre balistique.

M N est une clef à deux directions.

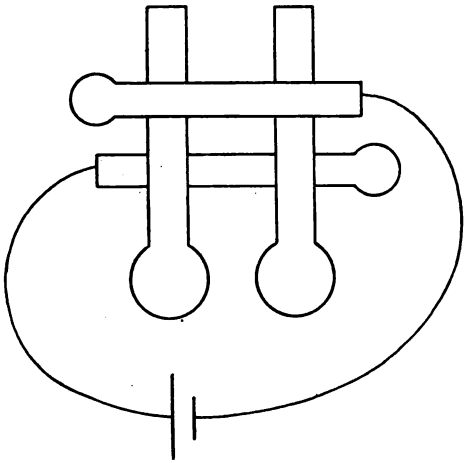


Fig. 219

Lorsque cette clef est dans la position M A, le condensateur se charge.

Au contraire, en M B, il se décharge dans le galvanomètre.

Comme clef à deux directions, on peut se servir commodément de la clef à décharge de Sabine représentée schématiquement par la figure 219.

Comparaison des forces électro-motrices des piles

Méthode de Law

On charge un condensateur successivement avec les piles E et E′, que l'on compare et on le décharge chaque fois dans un galvanomètre balistique. On lit dans chaque cas l'élongation produite. En appelant E et E′ les forces électro-motrices, α et α' les élongations, on a :

$$\frac{E}{E'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Le schéma est identique à celui relatif à la mesure des capacités, sauf que la pile de charge est remplacée successivement par la pile E, puis par la pile E′.

Digitized by Google

MESURE DU TEMPS

Nous avons vu (page 4) que le temps était une des trois grandeurs que nous avons appelées grandeurs fondamentales. Il nous reste à indiquer, pour terminer ces modes opératoires, quelques-unes des méthodes employées pour évaluer la durée d'un phénomène.

Nous pouvons séparer cette étude en trois parties, suivant que nous considèrerons :

1° Un phénomène d'une durée suffisamment longue ;

2° Un phénomène de courte durée ;

3° Un phénomène de très courte durée.

L'unité de temps adoptée est la seconde sexagésimale de temps moyen, c'est-à-dire la $\frac{1}{86400^{e}}$ partie du jour solaire moyen.

Pour les phénomènes de durée suffisamment longue, et nous entendons par là ceux dont la durée s'évalue en minutes, on se servira d'une horloge ou d'un chronomètre de précision. Nous ne décrirons pas ces appareils, dont l'usage est bien connu.

Pour les phénomènes dont la durée est de plusieurs secondes, on pourra se servir soit de chronomètres particuliers, dits *compte-secondes,* soit d'un pendule à secondes.

Les *compte-secondes* sont des appareils dans lesquels on peut mettre l'aiguille en mouvement à l'instant précis où l'on commence l'observation. On note en même temps la position de l'aiguille (cette position peut être, par exemple, le zéro de la division). A la fin de l'observation, on arrête l'aiguille en pressant sur un ressort. On lit ensuite la seconde position de l'aiguille.

Dans certains appareils dits *compte-secondes à pointage*, l'aiguille ne s'arrête pas, mais en appuyant sur le ressort, on marque un point noir sur le cadran. A cet effet, l'aiguille se termine par une pointe creuse que l'on garnit d'encre grasse à la glycérine. On peut ainsi faire plusieurs observations simultanées d'un phénomène et relever ensuite la position des points sur le cadran.

Digitized by Google

PENDULE A SECONDES

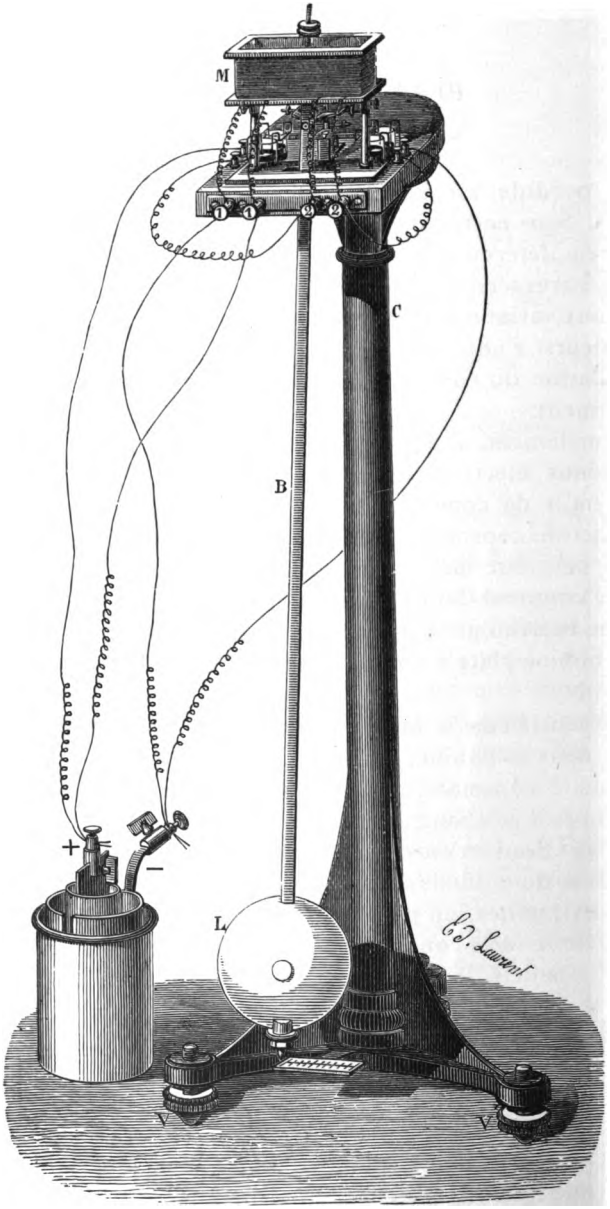
Le pendule est l'instrument par excellence de mesure du temps. Sans entrer dans aucun détail, nous rappellerons que l'on peut déterminer par le calcul la longueur du pendule qui, à Paris, bat exactement la seconde. Pour corriger les déformations dues aux variations de température, on se sert de systèmes compensateurs. Enfin, pour maintenir aussi longtemps que possible l'oscillation du pendule, on se sert de pendules entretenus électriquement.

Actuellement, il existe de nombreux systèmes de pendules entretenus électriquement. Ils ne diffèrent d'ailleurs que par des détails de construction. Nous ne les décrirons pas; nous indiquerons cependant la disposition adoptée par M. Bourbouze et qui peut être facilement réalisée.

Il se compose d'un pendule à la partie supérieure duquel est fixé un barreau aimanté qui peut osciller librement à l'intérieur d'une bobine plate à deux fils (semblable à celle du galvanomètre à fléau).

Pour entretenir le mouvement de ce pendule, il suffit de faire passer dans la bobine, à chaque oscillation simple, un courant d'intensité constante, mais de sens alternativement contraires. Pour opérer ce changement d'une manière régulière, on se sert d'un petit fléau en cuivre, dont le centre de gravité est très élevé au-dessus du point de suspension. Ce petit fléau porte, à chacune de ses extrémités, un petit pont qui, en tombant alternativement dans deux godets contenant du mercure, ferme le circuit d'une pile de Daniell. Le courant agit par influence sur le barreau aimanté et lui donne une impulsion qui se transmet au balancier. Pour obtenir le mouvement de bascule du fléau interrupteur, on a fixé sur le balancier une fourchette, dont les deux branches sont perpendiculaires au plan d'oscillation. Chacune d'elles est munie d'une petite vis, dont l'axe est parallèle à ce plan. On peut régler à volonté l'écartement de ces petites vis, qui viennent heurter, à chaque oscillation simple, le fléau interrupteur.

Digitized by Google



Digitized by Google

En fixant deux fils aux pôles de la pile, en opposition dans les deux fils de la bobine, on obtient sans commutateur l'inversion du courant.

Pour régler un pendule, on le compare à un chronomètre bien réglé, en comptant un grand nombre d'oscillations.

Pour les phénomènes de durée très courte et qui nécessitent la subdivision de la seconde, on utilise les vibrations d'un *diapason* pouvant donner 500 à 1000 vibrations par seconde. Nous avons vu (page 259) comment on pouvait inscrire les vibrations d'un diapason, à côté de celles d'un pendule électrique battant la seconde.

De même que le mouvement du pendule peut être entretenu électriquement, on peut aussi entretenir les vibrations d'un diapason en le munissant d'un électro-aimant. Pour mesurer la vitesse de rotation d'un appareil quelconque, comme une machine dynamo, par exemple, on se sert de *compte-tours* qu'on fixe sur l'axe de rotation par un pointeau sur lequel engrène une roue dentée.

Enfin, pour terminer ce qui est relatif aux méthodes de mesure du temps, nous signalerons la méthode optique, ou méthode stroboscopique, employée notamment par Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière et par M. Lippmann pour comparer les périodes d'oscillation de deux pendules. Nous ne décrirons pas ici cette méthode, dont l'explication sortirait un peu du cadre modeste de cet ouvrage et fait partie de ce qu'on peut appeler la physique de précision.

En terminant ces modes opératoires dont le nombre a été forcément limité, nous adressons nos remerciements à MM. Ducretet, Pellin et Carpentier, qui ont bien voulu nous confier un grand nombre de clichés.

Digitized by Google

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

MESURES

Mesures — Instruments de mesures

	Pages
Généralités sur les mesures	1
Vernier	6
Machine à diviser	12
Sphéromètre	17
Palmers	21
Niveau à bulle d'air	24
Cathétomètre	25
Mesure des angles	27

Vérification des lois de la chute des corps

Machine d'Atwood	31
Méthode graphique	37

Balance — Pesées

Méthode des doubles pesées	43
Mesure de la sensibilité d'une balance	44

Mesure des densités

Méthode de la balance hydrostatique	46
Méthode du flacon	58
Corrections des densités	61
Méthode de la balance de Mohr	65

Digitized by Google

Pages
Méthode des pipettes 66
Aréomètre à volume constant. 66
Aréomètre à poids constant 69
Aréomètre de M. Vandevyver 72
Tableaux des densités de quelques corps solides ou liquides . . 73

Essais des vins

Méthode de Gay-Lussac. 76
Compte-gouttes de M. Duclaux 78
Appareil Salleron. 79
Table des densités des mélanges d'eau et d'alcool absolu. 81

Compressibilité des gaz

Loi de Mariotte. 90
Application de la loi de Mariotte 95

Mesure de la pression atmosphérique

Baromètre fixe. 99
Baromètre Fortin. 100
Baromètre Tonnelot. 101
Corrections barométriques. 102
Mesure d'une hauteur par le baromètre. 105

CHALEUR

Thermométrie

Construction des thermomètres 106
Thermomètre à alcool. 113
Thermomètres à échelles fractionnées 115
Thermomètres métastatiques 116
Échelles thermométriques. 117
Comparaison des thermomètres 121

Dilatations

Généralités. 123
Tableau des dilatations linéaires 125
Méthode du thermomètre à poids 126
Procédé du thermomètre à tige. 127
Méthode des densités. 128

Digitized by Google

Calorimétrie

Pages
Maximum de densité de l'eau. 129
Calorimètre de Bunsen 131
Méthode des mélanges. 132
Calorimètre de M. Berthelot. 135
Chaleur de combinaison. 136
Chaleur de fusion de la glace. 137
Chaleur de vaporisation. 138
Tableau des chaleurs spécifiques. 140
Points de fusion. 142
Points d'ébullition 143

Densité des gaz et des vapeurs

Méthode de Regnault 148
Thermomètre à air 149
Méthode de Dumas. 151

Fabrication de la glace

Appareil Carré 156
Mélange réfrigérants. 157

Hygrométrie

Généralités. 158
Hygromètre Leroy 160
Hygromètre Daniell. 161
Hygromètre Regnault. 165
Hygromètre Alluard. 166
Hygromètre Crova 168
Hygromètre Bourbouze 168
Psychromètre 171
Détermination de la constante. 172
Table des forces élastiques de la vapeur d'eau 174

OPTIQUE

Photométrie

Photomètre de Foucault 179
Photomètre de Bunsen 179

Digitized by Google

Pages

Photomètre de Rumfort 180
Unités photométriques 181
Distances focales des miroirs et des lentilles 182
Focomètre de Silbermann 184
Etude des oculaires 186
Microscope composé 188
Dynamètre de Ramsden 190

Goniométrie

Goniomètre de Wollaston 191
Goniomètre de Babinet 194

Indices de réfraction

Généralités 196
Mesure des indices par le goniomètre 197
Mesure des indices par le microscope 199
Emploi des réfractomètres 201
Réfractomètre de M. Piltschikoff 201
Réfractomètre de M. Ch. Féry 202

Spectroscopie

Spectroscope à trois corps 211
Spectroscope à vision directe 212
Analyse spectrale 213
Spectre d'absorption 215
Colorimètre Duboscq 220

Saccharimétrie

Saccharimètre Soleil 223
Diabétomètre de Robiquet 227
Saccharimètre Laurent 230

Argenture du verre

Procédé Foucault 235

PHOTOGRAPHIE

De la chambre noire 238
De l'objectif 239

Digitized by Google

Pages
De l'image 241
Procédé au collodion 241
Procédé au gélatino-bromure d'argent 244
Bains de développement. 245
Tirage des positifs 247

ACOUSTIQUE

Sirène de Cagniard-Latour. 250
Sirène de M. Bourbouze. 253
Sirène de M. Pellat. 255
Emploi du sonomètre. 256
Lois des cordes. 258
Méthode graphique. 259
Lois de Bernouilli 260

ÉLECTRICITÉ

Signes conventionnels. 261
Unités électriques. 262
Montage des piles. 263
Électromètre à quadrants 273
Électromètre capillaire 277
Galvanomètres 279
Lois d'Ohm 284
Lois de Faraday 289
Galvanoplastie 294
Mesure des résistances 298
Effet Joule. 308
Mesure des forces électro-motrices 310
Mesure des capacités 314

MESURE DU TEMPS

Généralités. 316
Pendule à secondes. 317

Digitized by Google

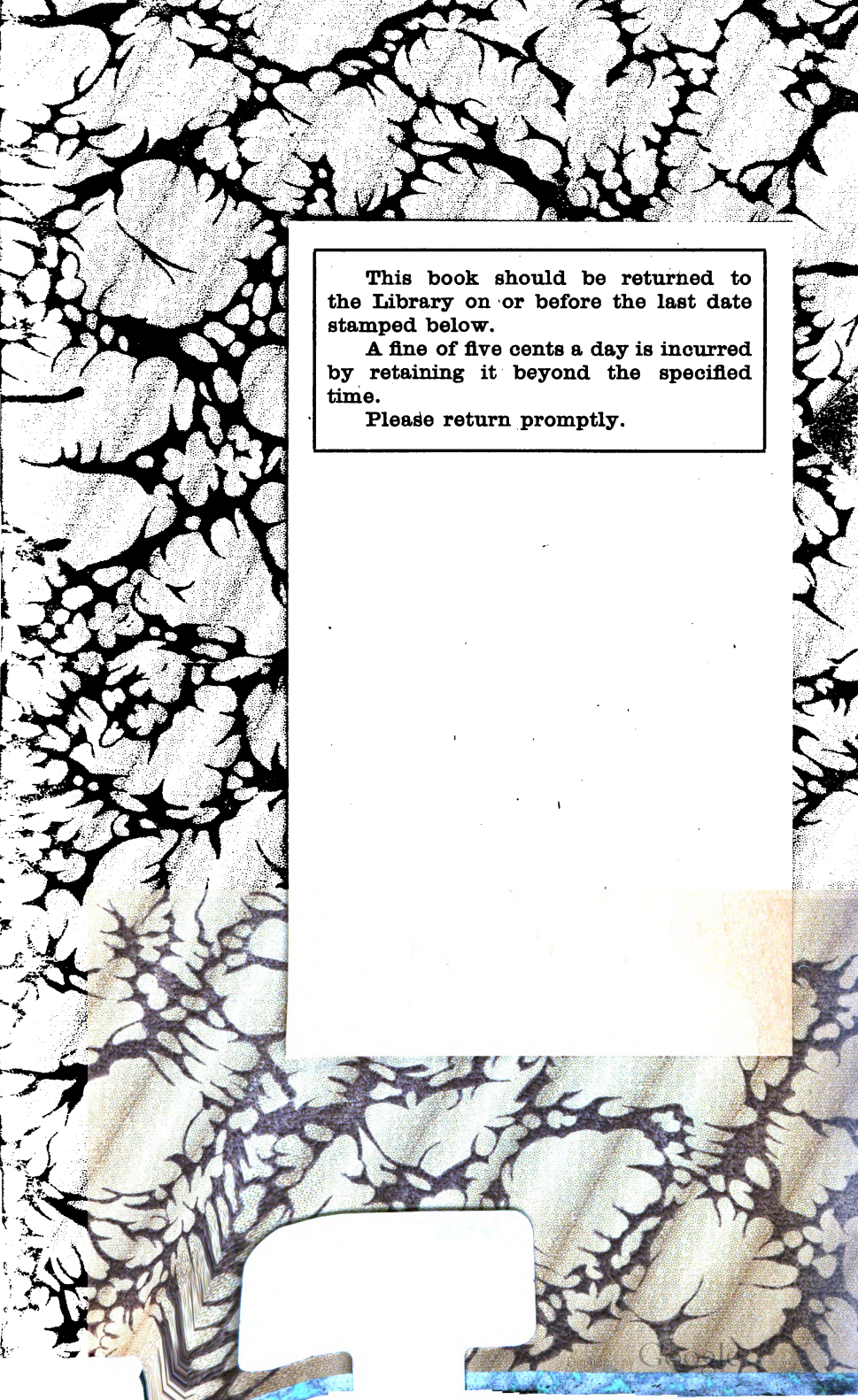
Digitized by Google

IMP. E. DESGRANDCHAMPS, 19, PLACE DENFERT-ROCHEREAU

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google



This book should be returned to the Library on or before the last date stamped below.

A fine of five cents a day is incurred by retaining it beyond the specified time.

Please return promptly.

Phys 428.96.5
Modes operatoires de physique.
Cabot Science
003488836
3 2044 091 973 818